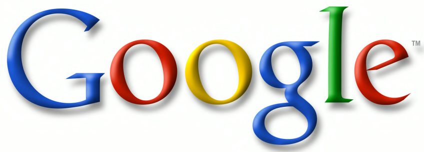
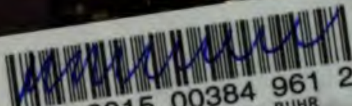
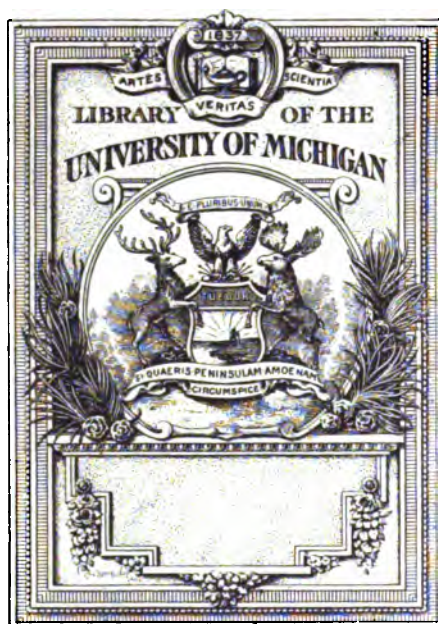
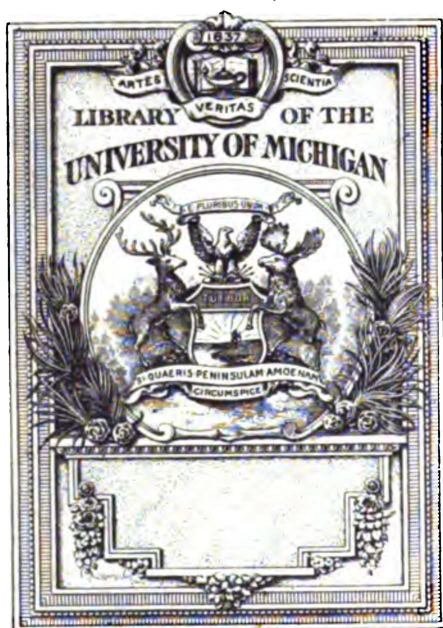



A 3 9015 00384 961 2
University of Michigan – BUHR


1837
ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE


1837
ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
TUEBOR
SI QUAERIS PENINSULAM AMOENAM
CIRCUMSPICE

ANNALES
DES MINES.

COMMISSION DES ANNALES DES MINES.

Les Annales des Mines sont publiées sous les auspices de l'administration générale des Ponts et Chaussées et des Mines, et sous la direction d'une commission spéciale formée par le Ministre des Travaux Publics. Cette commission est composée, ainsi qu'il suit, des membres du conseil général des mines, du directeur et des professeurs de l'École des mines, et du chef de la division des mines :

MM.

Cordier, insp. gén., membre de l'Acad. des Sciences, profess. de géologie au Muséum d'hist. naturelle, président.

Dufrénoy, insp. gén., directeur de l'École des mines, membre de l'Acad. des Sciences, prof. de minéralogie au Muséum d'histoire naturelle.

Élie de Beaumont, insp. général, membre de l'Acad. des Sciences, prof. de géologie au Collége de France et à l'École des mines.

Chéron, inspecteur général.

Thirria, inspecteur général.

Combes, inspecteur général, membre de l'Académie des Sciences, profess. d'exploitation des mines.

Juncker, inspecteur général.

MM.

Bineau, inspecteur général.

Levallois, ingénieur en chef, secrétaire du conseil général.

Le Play, ingénieur en chef, professeur de métallurgie.

De Boureuille, ingénieur en chef, chef de la division des mines.

De Sénarmont, ingénieur en chef, membre de l'Académie des Sciences, professeur de minéralogie.

Ebelmen, ingén., prof. de chimie à l'École des mines et de céramique au Conservatoire des arts et métiers.

De Cheppe, ancien chef de la division des mines.

Couche, ingénieur, professeur de chemins de fer et de construction, secrétaire de la commission.

L'administration a réservé un certain nombre d'exemplaires des Annales des Mines pour être envoyés, soit à titre de don aux principaux établissements nationaux et étrangers, consacrés aux sciences et à l'art des mines, soit à titre d'échange aux rédacteurs des ouvrages périodiques français et étrangers, relatifs aux sciences et aux arts. — Les lettres et documents concernant les Annales des Mines doivent être adressés, *sous le couvert de M. le Ministre des Travaux Publics, à M. le secrétaire de la commission des* Annales des Mines, à Paris.

Avis de l'Éditeur.

Les auteurs reçoivent *gratis* 15 exemplaires de leurs articles. Ils peuvent faire faire des tirages à part à raison de 9 fr. par feuille jusqu'à 50, 10 fr. de 50 à 100, et 5 fr. pour chaque centaine ou fraction de centaine à partir de la seconde. Le tirage à part des planches est payé sur mémoire, au prix de revient.

La publication des Annales des Mines a lieu par cahiers ou livraisons qui paraissent tous les deux mois. — Les trois livraisons d'un même semestre forment un volume. — Les deux volumes composant une année contiennent de 80 à 90 feuilles d'impression, et de 18 à 24 planches gravées. — Le prix de la souscription est de 20 fr. par an pour Paris, de 24 fr. pour les départements, et de 28 fr. pour l'étranger.

PARIS. — IMPRIMÉ PAR E. THUNOT ET Ce, RUE RACINE, 26.

ANNALES

DES MINES

OU

RECUEIL

DE MÉMOIRES SUR L'EXPLOITATION DES MINES

ET SUR LES SCIENCES ET LES ARTS QUI S'Y RAPPORTENT;

RÉDIGÉES

Par les Ingénieurs des Mines,

ET PUBLIÉES

Sous l'autorisation du ministre des Travaux publics.

CINQUIÈME SÉRIE.

TOME I.

PARIS.

CARILIAN-GŒURY ET V^{OR} DALMONT,

LIBRAIRES DES CORPS DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES,

Quai des Augustins, n° 49.

1852

ANNALES

DES MINES.

CHEMINS DE FER D'ANGLETERRE EN 1851.

RAPPORT

ADRESSÉ A M. LE MINISTRE DES TRAVAUX PUBLICS,

Par M. LE CHATELIER, ingénieur en chef des mines.

INTRODUCTION.

Une étude complète des chemins de fer anglais est à peu près impossible pour un voyageur de passage, dont le temps et les moyens d'investigation sont toujours fort limités ; le grand nombre de lignes, l'isolement dans lequel se tiennent les ingénieurs chargés des principaux services, et par suite l'absence de règles générales et communes pour la direction qu'ils impriment à ces services, la rareté des documents imprimés ou écrits, la difficulté de joindre les personnes et de les détourner pendant quelques instants de leurs nombreuses occupations, etc., sont autant de circonstances qui rendent cette étude difficile. L'exposition présentait d'ailleurs peu de ressources pour l'étude du matériel,

un petit nombre de constructeurs ayant envoyé leurs produits au Palais-de-Cristal, et ces produits n'étant le plus souvent que des exceptions qui ne peuvent pas donner une idée exacte des formes et des dispositions généralement adoptées.

Je ne puis donc pas présenter un exposé complet de la situation des chemins de fer anglais, j'ai seulement consigné dans ce rapport, à la suite les unes des autres, les observations que j'ai pu recueillir dans un séjour de six semaines; je ne me suis occupé d'ailleurs que des questions relatives à l'exploitation, et aux chemins de fer de l'Angleterre seulement.

Mon travail se divisera en quatre parties : matériel fixe ou voie de fer et accessoires; matériel roulant; exploitation et administration; législation et statistique.

J'ai transformé toutes les mesures anglaises en mesures françaises en adoptant en nombres ronds les données suivantes :

1 livre sterling.	=	25 francs.
1 yard.	=	0m,9144
1 pied.	=	0m,3048
1 gallon.	=	4l,5434
1 livre avoir-du-poids. . .	=	0kg,4534
1 tonne.	=	1000kg
1 mille.	=	1km,6093

PREMIÈRE PARTIE.

MATÉRIEL FIXE.

J'ai compris sous la dénomination de *matériel fixe* la voie de fer proprement dite, les rails et leurs supports, et les accessoires de la voie, tels que changements et croisements de voie, plaques tournantes, chariots roulants, grues hydrauliques, grues et engins divers employés dans les gares, etc.

L'introduction des machines pesantes et l'adoption générale des trains à grande vitesse, en Angleterre, ont fait reconnaître la nécessité de consolider la voie de fer sur ses supports et de donner à ceux-ci plus de fixité; depuis quelques années déjà les compagnies et leurs ingénieurs se préoccupent vivement de la rapide destruction des voies. De nombreux systèmes ont été proposés pour modifier les conditions d'établissement de la voie de fer, des essais ont été faits sur presque toutes les lignes; on trouve là d'utiles enseignements à recueillir, et c'est du reste à peu près le seul point qui présente quelque nouveauté dans l'étude des chemins de fer de ce pays. Avant d'y arriver, je jeterai un coup d'œil sur la question de la largeur des voies qui reste maintenant encore l'objet de contestations aussi vives que par le passé, non plus peut-être pour la question d'art elle-même, mais plutôt par suite des rivalités qu'elle a suscitées entre les compagnies de l'ouest et du nord-ouest.

§ 1er. *Largeur de la voie.*

A l'origine des chemins de fer anglais on a donné généralement à la voie une largeur de 1m,455 mesurés entre les bords intérieurs des rails; c'était la largeur adoptée par Georges Stephenson pour le chemin de fer

de Liverpool à Manchester, concédé en 1826 et terminé en 1830, chemin qui peut être considéré comme le point de départ du système des chemins de fer actuels, construits pour le transport des voyageurs et pour celui des marchandises générales. Quelques lignes, construites plus tard en Angleterre et en Écosse avec une voie plus large, ont été ramenées à cette largeur normale, consacrée déjà par un grand nombre d'actes du parlement, dès que le développement des lignes adjacentes a fait sentir la nécessité d'une voie uniforme.

La seule exception à cette règle, exception systématique qui a pris une extension considérable, est celle que présente le Great-Western. — En 1835, M. Brunel fils, préoccupé depuis quelque temps déjà de l'accroissement de puissance qu'il serait nécessaire de donner aux machines locomotives, proposa aux directeurs du chemin de fer du Great-Western, qui lui avaient confié l'étude et la construction de cette ligne, d'adopter pour la voie une largeur de $2^{m},134$; l'acte de concession de 1835, au lieu de fixer, comme d'habitude, la largeur de la voie, laissa la compagnie libre à ce sujet, et celle-ci adopta les propositions de M. Brunel.

La voie large s'est étendue depuis cette époque jusqu'à Bristol, Exeter, Plymouth, et pénètre maintenant dans le Cornwall; elle a jeté d'ailleurs de nombreuses ramifications au nord et au sud de cette direction principale.

Au fur et à mesure du développement des chemins de fer anglais, l'opinion se préoccupa de plus en plus des inconvénients que présentait la différence de largeur de voie entre les lignes qui sillonnaient d'une part la plus grande partie du territoire au nord, à l'est et au sud, et celles qui se rattachaient de l'autre part au système du Great-Western. — En 1845, une enquête parlemen-

taire fut instituée, et une commission fut nommée pour rechercher quelles étaient les mesures à prendre afin d'assurer l'uniformité de la voie des chemins restant à concéder, et afin de ramener, s'il était possible, les chemins construits à une jauge uniforme; la commission était en outre chargée d'examiner les moyens de toute nature qui pourraient être proposés pour remédier au mal résultant du défaut d'uniformité dans la largeur de la voie.

Cette commission d'enquête, après avoir reçu les dépositions des ingénieurs qui avaient construit les chemins de fer alors existants, des ingénieurs et des principaux chefs de service des chemins de fer en exploitation, et de toutes les personnes dont l'expérience pouvait jeter quelque jour sur la question, arriva aux conclusions suivantes :

» 1° Que, pour ce qui concernait la sûreté, la com-
» modité et la convenance des voyageurs, il n'existait
» pas de motif décidé de préférence en faveur de l'une
» ou de l'autre des deux voies, si ce n'est que sur la
» voie large, le mouvement était généralement plus
» doux à de grandes vitesses.

» 2° Que sous le rapport de la vitesse l'avantage était
» à la voie large; mais que dans la pensée de la com-

» 4° Que la voie large entraînait des frais de premier » établissement plus considérables ; mais qu'il avait été » impossible de découvrir, s'il existait, soit dans l'entretien de la voie, soit dans les frais de locomotion, » soit dans les autres dépenses d'exploitation, quelques » causes d'économie capables de compenser l'excédant » des frais de premier établissement. »

La commission, considérant que l'intérêt des voyageurs, en nombre relativement assez restreint, qui pouvaient désirer le maintien de la circulation à grande vitesse, ne pouvait pas être mis en balance avec l'intérêt commercial du pays, et que, par suite, s'il était nécessaire d'arriver à l'uniformité de largeur de voie, c'était la voie large qui devait être réduite aux dimensions de la voie étroite, d'autant plus qu'elle ne présentait en exploitation que 441 kilomètres contre 3.059 de voie étroite, considérant enfin que le rétrécissement de l'une, à longueur égale, serait moins coûteux que l'élargissement de l'autre, fut conduite en dernière analyse à formuler l'avis suivant :

« 1° Que la voie de 1^{m},435 fût déclarée, par le pou» voir législatif, la voie normale applicable à tous les » chemins en construction ou à construire dans la » Grande-Bretagne.

» 2° Qu'à moins d'une autorisation expresse de la » législature, il fût interdit aux directeurs de toute » compagnie de modifier la largeur de la voie de sa » ligne.

» 3° Que pour compléter la chaîne des voies de com» munication à petite largeur, du nord de l'Angleterre » aux côtes du sud, il convenait de provoquer l'établis» sement d'un chemin de fer à voie étroite d'Oxford à » Reading et de là à Basingstoke, ou, par toute autre

» direction plus courte, de réunir le chemin projeté de
» Rugby à Oxford avec la ligne du South-Western.

» 4° Que, toute jonction à établir avec une ligne à
» large voie devant entraîner une rupture de charge,
» si le premier paragraphe était adopté, il y aurait un
» grand avantage commercial à réduire la voie des lignes
» à grande largeur existantes à la voie uniforme de
» 1m,435; qu'en conséquence, il serait désirable que
» l'on pût trouver quelque moyen équitable pour réta-
» blir l'uniformité de la voie, ou tout au moins quelque
» combinaison qui permît de faire passer, sans rupture
» de charge et sans danger, les voitures de la voie étroite
» sur la voie large.

Les propositions de la commission soumises au Board of Trade ne furent pas complétement approuvées, et les mesures législatives adoptées par le parlement, sur l'avis du Board of Trade et d'un comité spécial, tout en consacrant en principe l'adoption de la voie étroite, autorisèrent le maintien de la voie large pour les prolongements du Great-Western dans le Cornwall et pour l'établissement des embranchements destinés à desservir les localités adjacentes à la ligne principale; en même temps il fut décidé que dans les cas particuliers où la mesure paraîtrait opportune, une disposition spéciale de la loi pourrait autoriser une modification de la voie normale de 1m,435. En effet, dans la session suivante diverses lignes furent concédées au nord du Great Western, avec autorisation d'adapter la voie à grande largeur, mais sous la réserve que les compagnies pourraient être obligées, par une décision des Commissaires des chemins de fer (1), à ajouter de

(1) Cette institution créée en 1846 est investie des attributions du Board of Trade, en ce qui concerne les chemins de

nouvelles lignes de rails à celles de la voie large, pour former une voie à petite largeur, ou, en d'autres termes, pour établir une voie mixte appropriée à la circulation des véhicules des deux systèmes.

Une nouvelle enquête ordonnée en 1847 par la chambre des lords, et dirigée par les Commissaires des chemins de fer, a laissé la question dans le même état; l'établissement des voies mixtes dans la région comprise entre Great-Western et le London and North-Western paraît être le seul palliatif proposé pour remédier à l'inconvénient de la différence de largeur. Maintenant la lutte entre les intérêts qui se rattachent à la voie large, personnifiés dans le Great-Western, et ceux qui se rattachent à la voie étroite, personnifiés également dans la puissante compagnie du London and North-Western, est plus vive que jamais; le Great-Western qui atteint déjà Birmingham, s'est ménagé un moyen d'accès vers la Mersey et vers Manchester, en s'alliant avec les compagnies qui possèdent les lignes rayonnant autour de Chester, de manière à pénétrer au centre des riches districts manufacturiers dont la compagnie du London and North-Western était jusqu'ici le seul débouché vers Londres. Dans cette lutte, les grandes compagnies en présence cherchent à s'assurer la propriété ou l'alliance des lignes intermédiaires, en faisant abstraction des conditions d'établissement et de largeur de la voie; le Great-Western a acheté ou pris à bail des lignes à voie étroite, mais peu de temps s'écoulera sans doute avant que la grande largeur de voie, à l'aide de ces associations, fasse irruption complète dans la région du Nord.

---

fer; elle est chargée d'exercer le contrôle et de prendre les mesures administratives relatives à la construction ou à l'exploitation.

La question de la largeur de la voie n'a plus guère en France qu'un intérêt rétrospectif, toutes les lignes étant construites ou tracées avec la voie étroite de 1m,435 que nous avons empruntée à l'Angleterre avec ses machines ; il peut cependant y avoir quelque utilité à faire connaître les arguments mis en avant par les partisans des deux systèmes, et à rechercher ce qu'il y a de fondé dans les opinions des uns et des autres ; le développement de l'industrie des chemins de fer a été si rapide depuis le petit nombre d'années qui nous sépare de leur origine, les dimensions des machines ont été tellement accrues, qu'on peut dès à présent se demander si la petite largeur de voie sera suffisante pour les besoins d'un avenir plus ou moins prochain, et s'il n'est pas regrettable qu'elle ait été adoptée en France.

M. Brunel, dans l'enquête de 1845, a déclaré que c'était en songeant à la vitesse, qu'il serait prochainement nécessaire d'appliquer au transport des voyageurs, et aux lourdes charges, qu'il faudrait traîner pour suffire au trafic des chemins de fer, qu'il avait été conduit à proposer l'élargissement de la voie communément adoptée ; suivant lui l'ensemble d'un chemin de fer, considérée comme une machine, était trop faible avec la voie de 1m,435, pour suffire au travail qu'on devait en exiger ; il fallait augmenter toutes les dimensions de cette machine pour la mettre en rapport avec les masses à transporter et avec la vitesse nécessaire ; après avoir fait l'expérience du Great-Western, il déclarait que, s'il y avait quelques changements à faire à son plan primitif, c'était d'élargir encore un peu la voie. Dans l'opinion de M. Brunel et des personnes attachées à l'exploitation des chemins de fer à large voie, ce système permet seul de donner aux machines une puissance suffisante pour répondre aux besoins du trafic ; il per-

met de donner aux voitures des dimensions plus grandes et plus commodes, d'augmenter le diamètre des roues des véhicules, sans établir une disproportion fâcheuse entre l'écartement transversal des points d'appui et la hauteur du centre de gravité des masses en mouvement; il diminue l'usure du matériel, et donne des garanties de sécurité plus complètes. Les frais d'exploitation ne sont pas plus considérables que sur la voie étroite, et la puissance des appareils, qui dispense dans certains cas de recourir à l'emploi de deux machines pour remorquer des charges considérables, peut devenir une source d'économie; le poids mort relatif des véhicules n'est pas augmenté, mais leur poids absolu étant augmenté, la sécurité est accrue en proportion. Les machines sont plus faciles à visiter, à nettoyer et à réparer; le mouvement des voitures est beaucoup plus doux, et l'ensemble présente d'excellentes conditions de stabilité. La seule objection que l'on puisse adresser au système est l'augmentation des frais d'établissement, mais elle se réduit à peu de chose, si l'on remarque que la largeur de l'entre-voie et des accotements restant la même, ou pouvant même être un peu diminuée, il suffit d'élargir de 1m,219 au plus la largeur des terrassements et des ouvrages d'art, ce qui n'entraîne pas une augmentation proportionnelle de la dépense.

Les partisans de la voie étroite déclarent que, dans leur opinion, la largeur de 1m,435 est suffisante, qu'il n'existe pas de motifs qui puissent les conduire à élargir la voie adoptée, dans le but d'obtenir de la sécurité, de la puissance de traction ou de la vitesse; que si pendant quelque temps on a pu désirer, au point de vue de la construction des machines, un peu plus d'espace entre les rails, les perfectionnements apportés depuis cette époque à la machine locomotive, ont rendu cette

augmentation inutile, même avec les machines à cylindres intérieurs qui sont celles qui réclament le plus d'espace. Ils ne trouvent aucun avantage à l'élargissement de la voie, ils y trouvent même plusieurs inconvénients; les frais de construction du chemin, du matériel, des ateliers, des stations sont plus considérables; la résistance en mouvement dans les courbes est accrue, il faut augmenter leur rayon, ainsi que celui des changements de voie; les plaques tournantes sont d'une dimension excessive, et sont un embarras dans les stations; les dépenses d'exploitation sont les mêmes, si elles ne sont pas plus fortes; on peut obtenir des machines aussi puissnntes, une vitesse aussi considérable, avec la même sécurité, sur la voie étroite que sur la voie large; les voitures larges, à quatre places par banquettes sont moins commodes que les voitures de la voie étroite à trois siéges; les wagons de marchandises de la voie large ne sont plus maniables et augmentent les difficultés de manutention dans les gares; lorsqu'ils sont incomplétement chargés, il y a une perte d'espace considérable. En somme, l'introduction de la voie large n'a fait que jeter un grand embarras dans le pays, sans produire aucun avantage équivalent.

C'est à peu près dans les termes qui précèdent qu'on peut résumer les motifs développés devant la commission d'enquête de 1845, par les ingénieurs qui doivent être considérés comme la personnification des deux systèmes, MM. Brunel et Stephenson, et par leurs élèves; mais un grand nombre d'ingénieurs moins engagés, moins compromis dans la question, s'accordaient à cette époque à reconnaître que la voie la plus convenable serait une voie intermédiaire, plus large que la voie de 1^{m},435, qui ne répondait plus suffisamment aux besoins de la construction des machines, à la vitesse

et à la sécurité nécessaires, mais plus étroite que la voie de Brunel qui dépassait le but. C'est, après avoir recueilli un très-grand nombre de témoignages de cette nature, que le major général Pasley avait en 1843 proposé d'adopter la voie de 1m,600 aux chemins de fer d'Irlande, pour lesquels il y avait encore à peu près table rase ; c'est en effet celle qui a été appliquée d'une manière uniforme au réseau des chemins de fer de ce pays.

En 1840, M. Bineau, en faisant connaître le résultat des observations qu'il avait recueillies en Angleterre en 1838 et 1839, constatait l'insuffisance déjà évidente de la voie anglaise et recommandait en France, où la question n'était pas encore sérieusement engagée, l'adoption de la voie de 1m,60.

Les commissaires des chemins de fer dans leur rapport de 1848, après avoir recueilli contradictoirement les dires des ingénieurs de la voie large et de la voie étroite, après avoir pris connaissance des nombreuses expériences faites par M. Daniel Gooch pour mesurer le travail de la vapeur dans les cylindres des machines et la résistance des trains, arrivaient aux conclusions suivantes :

« Quoique le pouvoir des machines puisse avoir été » augmenté sur les deux voies et particulièrement sur » la voie large, l'effet d'une telle augmentation s'est » manifesté surtout par l'augmentation de vitesse des » trains *express ;* et il ne paraît pas qu'elle ait produit » une différence matérielle dans les avantages relatifs » des deux voies pour le trafic des marchandises.

» Il est notoire que la vitesse, avec des trains de » voyageurs plus considérables et plus lourds, est main» tenue sur une partie de la ligne du Great-Western, » avec un degré de régularité plus marqué que sur les

» autres chemins de fer du pays. Ce fait est connu et » parfaitement apprécié par une grande partie du » public.

» L'avantage que les lignes à large voie peuvent ac- » tuellement procurer à ce genre de trafic, pour lequel la » plus petite économie de temps est importante, et par » conséquent pour lequel il est désirable d'atteindre » les plus grandes vitesses compatibles avec la sécurité, » doit être attribué principalement à la plus grande » puissance des machines qu'elles peuvent mettre en » usage ; il est nécessaire par suite d'examiner quelles » sont les circonstances dont le pouvoir et la vitesse des » machines locomotives dépend principalement, et » comment ces circonstances sont affectées par la diffé- » rence de largeur des voies. »

Les commissaires, après avoir discuté les éléments dont il est nécessaire de tenir compte dans l'appréciation de la puissance des machines, admettent qu'en tenant compte de la résistance des rails, qui ne peut pas dépasser une certaine limite sans entraîner des frais de construction exagérés, on doit fixer entre 1.600 et 1.800 kilog., l'adhérence d'une seule paire de roues motrices à de très-grandes vitesses; en partant de ce point, et en considérant que la puissance des machines dépend surtout de la puissance d'évaporation des chaudières, ils arrivent à cette conclusion que, sur niveau, les machines de la voie à grande largeur peuvent traîner un convoi de voyageurs de 60 tonnes à la vitesse de $96^{km},5$ à l'heure, tandis que les machines de la voie à petite largeur ne pourraient lui imprimer qu'une vitesse de 80 kilom. A la descente, l'avantage de la voie à grande largeur disparaît lorsque l'inclinaison devient un peu forte, parce que ce sont alors les conditions de sécurité qui limitent seules la vitesse ; sur les rampes

l'avantage de la grande largeur va également en diminuant, parce que le poids du remorqueur absorbe une plus grande partie de la puissance motrice, et la balance entre les deux systèmes a lieu pour l'inclinaison de 1/170.

Les commissaires concluent de ces appréciations que, quel que soit l'inconvénient de la différence de largeur des voies, il y a lieu d'autoriser la compagnie du Great-Western à étendre son système d'Oxford à Birmingham, et à ne pas le restreindre dans les limites précédemment fixées par le parlement.

Depuis cette époque les machines de la voie étroite ont reçu des améliorations qui leur permettent d'accomplir le travail dont les machines de la voie à grande largeur paraissaient seules capables; quoique celles-ci puissent également recevoir des modifications qui leur permettraient de conserver toujours une avance marquée sur leurs rivales, la question de vitesse n'a plus la même importance dans l'appréciation des conditions de largeur les plus convenables; la résistance des rails restant la même, et les masses qu'il est prudent de remorquer devant être réduites au fur et à mesure que la vitesse devient plus considérable, on peut admettre que la voie étroite peut satisfaire aux nécessités actuelles de la circulation rapide et aux exigences de l'avenir aussi bien que la voie à grande largeur; l'une donnera peut-être moins de facilité que l'autre pour rendre le mouvement des voitures aussi doux que possible, pour rendre la production de vapeur et la traction plus économiques, mais on ne doit pas craindre que la voie adoptée en France soit un obstacle absolu de la grande vitesse qui se développera encore dans des limites très-étendues; il y a tout lieu de croire que si une largeur un peu plus grande, celle de 1m,60 par exemple avait été adoptée,

les machines auraient pu être construites dans des proportions très-convenables et ne le céder en rien pour le service des trains *express* aux machines du Great-Western, dans les limites que comporte la sécurité.

L'objection principale que peut soulever l'adoption de la voie de $1^m,435$ me paraît être surtout la difficulté de construction des machines à marchandises. En effet, l'accouplement de six roues dans ces machines permettant d'utiliser tout leur poids pour l'adhérence, sans surcharger quelques-uns des essieux d'une manière nuisible à la conservation de la voie, l'augmentation chaque jour croissante du trafic des voyageurs qui laisse moins d'intervalles pour le passage des trains à petite vitesse et l'augmentation du trafic des marchandises qui accroît en même temps le nombre de ces derniers trains, l'adoption de fortes inclinaisons sur beaucoup de chemins, etc., sont autant de circonstances qui permettent ou qui nécessitent l'emploi de machines très-puissantes montées sur de grandes roues; l'obligation de donner un grand diamètre aux roues motrices des machines à marchandises, $1^m,50$ maintenant, sans doute $1^m,60$ ou plus dans un avenir plus ou moins rapproché, nécessite l'adoption de cylindres d'un très-grand diamètre, en même temps que l'économie de la puissance motrice exige des chaudières très-volumineuses. Dans cet état de choses, les constructeurs sont fort gênés par le manque d'espace entre les roues, qui limite le diamètre des cylindres, la largeur du foyer et le diamètre du corps cylindrique de la chaudière; on est obligé de recourir à des expédients pour trouver la place du mécanisme de distribution, pour augmenter la surface de chauffe, et enfin de compte on arrive à donner aux chaudières des hauteurs peu convenables;

une augmentation de largeur de 20 à 30 centimètres entre les rails lèverait presque entièrement ces difficultés.

On doit donc, à mon avis du moins, regretter qu'à l'origine de nos grandes lignes de chemins de fer on n'ait pas discuté sérieusement la question de la largeur de la voie, en établissant, par exemple, une enquête dans le genre des enquêtes parlementaires en Angleterre; il me paraît incontestable qu'en 1840, à l'époque où nous n'avions encore qu'une très-petite longueur de chemins de fer en exploitation, chemins de fer qui pouvaient, pour la plupart et jusqu'à l'époque où un renouvellement de la voie serait devenu nécessaire, rester isolés, on serait arrivé à adopter une largeur de voie intermédiaire entre la voie anglaise proprement dite et celle du Great-Western; l'Allemagne qui n'a pas pu être entraîné par l'exemple isolé du duché de Bade, aurait pu l'être par le nôtre; l'interposition des chemins de fer belges dans le réseau continental aurait pu seule apporter un obstacle sérieux à l'adoption générale d'une largeur mixte, si toutefois une rupture de charge à la frontière d'un grand état comme la France peut être considéré comme un inconvénient très-grave.

Dans les pays où la question n'est pas encore engagée d'une manière sérieuse, on ne devra pas hésiter à imiter l'exemple de l'Irlande où l'on a adopté la voie de $1^m,60$, peut-être insuffisante, mais déjà préférable à la voie de $1^m,435$; une largeur comprise entre $1^m,70$ et $1^m,80$ répondrait selon toutes les apparences aux nécessités du présent ou à celles que l'on peut prévoir pour l'avenir ; avec ces dimensions, il n'est pas nécessaire d'augmenter d'une manière notable la largeur des ouvrages, car l'élargissement de la voie devrait avoir surtout pour effet de donner aux véhicules, à leur base,

une largeur mieux en rapport avec celle que les nécessités du trafic ont fait adopter en élévation pour les caisses.

§ 2. *Supports de la voie.*

Des chemins de fer établis en Angleterre vers la fin du siècle dernier, et qui forment la transition entre les chemins à ornières et les chemins actuels, avaient des rails en fonte, placés sur des dés en pierre enfouis dans une couche de sable (1); plus tard des traverses en bois furent employés pour recevoir les chairs ou coussinets en fonte servant à fixer les rails, dans les parties où le sol n'avait pas une stabilité complète, ou jusqu'à ce que l'effet des tassements fût complétement assuré. Ce n'est que depuis l'introduction des machines locomotives et le grand développement que les chemins de fer à voyageurs ont reçu dans la période de 1830 à 1840, que l'emploi des traverses est devenu général. En Amérique, l'emploi des longuerines avait au contraire prévalu généralement par suite de l'abondance du bois et de la rareté du fer; ce mode de supports n'a été appliqué, sur une grande échelle, en Angleterre que par M. Brunel, sur le Great-Western et sur les lignes qui en dépendent; quelques applications partielles ont eu lieu cependant sur les chemins de Londres à Croydon, de Birmingham à Glocester, de Bolton à Manchester, mais le système prédominant dans ces dernières années est celui des traverses; sur un grand nombre de points les dés en pierre ont été démontés et

---

(1) Les premiers dés employés en Angleterre ont été des blocs de bois carrés; c'est ainsi qu'avait été posée originairement une partie de la voie du chemin de fer de Stockton à Darlington, mais ces supports ont été promptement remplacés par des dés en pierre.

remplacés par des traverses, et en parcourant l'Angleterre on voit les accotements d'un grand nombre de lignes jonchés de dés en pierre auxquels on substitue successivement des supports en bois. C'est même un fait assez curieux que de voir l'abandon de l'ancien système de supports se consommer au moment où les perfectionnements apportés aux machines, et les essais de toute nature que l'on tente pour améliorer la pose des voies, font disparaître en partie les inconvénients qui l'ont fait proscrire, et le rendent supportable, lorsqu'on n'a plus à tenir compte des frais de premier établissement.

La pose des dés en pierre est assez coûteuse, et elle exige beaucoup de soins; lorsque la qualité de la pierre n'est pas très-convenable, les blocs se fendent sous l'action des chevilles en bois et des chevilles en fer dont l'emploi combiné est nécessaire pour fixer les coussinets; lorsque la pierre est tendre, quoique douée d'une grande ténacité, les coussinets ébranlés par l'action des véhicules circulant à grande vitesse, la creusent à la longue et s'y incrustent en quelque sorte, ce qui exige un remaniement fréquent des attaches; l'absence de liaison entre les deux cours de rails, l'indépendance des dés qui permet leur déversement, ou leur enfoncement irrégulier dans le ballast, leur épaisseur et la difficulté du bourrage et du relevage, rendent leur entretien dispendieux; enfin leur manque d'élasticité, malgré le soin qu'on a pris dans beaucoup de cas de placer sous le coussinet une plaque de feutre goudronné, est nuisible à la conservation des rails et du matériel roulant et même jusqu'à un certain point incommode aux voyageurs.

Les traverses en bois donnent incontestablement à la voie plus de fixité que les dés, il n'y a plus à craindre les variations d'écartement des rails, le déversement

des cousinets, l'entretien est plus facile et plus économique; mais les traverses se détruisent rapidement et leur renouvellement est une source de frais considérables, les moyens d'attache des coussinets sont insuffisants, les chevilles s'ébranlent parce que le bois pourrit et surtout par suite des actions exercées sur les rails par le mouvement des trains, les traverses prennent du jeu dans le ballast et exigent son remaniement fréquent; elles éprouvent même souvent un déplacement transversal à la voie qui se manifeste par des ondulations sensibles à l'œil dans la pose des rails.

Le système des longuerines tel qu'il a été adopté par M. Brunel sur la ligne du Great-Western, présente quelques inconvénients, mais il est incontestablement préférable au système des traverses. Les rails, soutenus dans toute leur longueur, n'ont pas besoin d'avoir une résistance et un poids aussi considérables que les rails ordinaires fixés sur des supports discontinus, la résistance du bois s'ajoutant à celle du fer; la déflexion aux joints est moins considérable et les chocs qui en sont la conséquence moins intenses; tout le système présente une élasticité favorable à la conservation du matériel; en cas de déraillement les roues sorties de la voie peuvent rouler sur les longuerines et les chances d'accident sont atténuées; on a objecté au système des longuerines son prix de revient plus élevé et la plus grande quantité de bois nécessaire pour supporter les rails, on a objecté également les frais d'entretien plus considérables, mais les objections tombent d'elles-même, si l'on remarque qu'à l'époque où des comparaisons de cette nature étaient faites, les traverses n'étaient pas aussi rapprochées et n'avaient pas des dimensions aussi considérables que maintenant, que la vitesse des trains n'était pas encore accrue d'une manière aussi

générale qu'à présent, et que le terme de comparaison a toujours été la voie du Great-Western, de telle sorte que l'excédant des dépenses nécessaires pour établir le système de la voie large, et pour résister à des machines et véhicules d'un poids considérable, était porté en partie au compte du système de supports longitudinaux.

En 1849, M. R. Stephenson, qui avait été jusque-là partisan exclusif du système des traverses, reconnaissait qu'il n'y avait pas de différence appréciable entre les deux systèmes pour les frais de premier établissement et d'entretien, et il inclinait même à considérer le système des longuerines comme préférable, pour les grandes vitesses, à celui des traverses. On reconnaît maintenant sans contestation que le système des longuerines exige moins de bois que celui des traverses; les seules difficultés qu'il paraisse présenter sont l'obstacle apporté par des supports continus à l'écoulement des eaux superficielles, lorsque le balast n'est pas très-perméable, et la solidarité du système qui produit une certaine gêne pour le relevage des parties de voie déprimées par les tassements du balast ou du sol.

Depuis quelque temps, les ingénieurs, en Angleterre comme dans les autres pays, font de nombreuses tentatives pour améliorer les systèmes de supports actuellement en usage; avant d'indiquer en quoi consistent ces tentatives, j'essayerai de préciser avec plus de détail les causes de défectuosité des systèmes actuels, et de fixer les points auxquels il importe spécialement de s'attacher.

Le principal défaut des suppports en bois, traverses ou longuerines, est leur peu de durée et les frais occasionnés par la nécessité de les renouveler à des intervalles de temps assez rapprochés. Cet inconvénient est surtout sensible pour les supports en bois résineux dont

l'usage est à peu près exclusif en Angleterre. On estime en Angleterre à dix années la durée des traverses de sapin non préparées, et on calcule à raison de 5 fr. le prix moyen de la traverse rendue sur le chantier ; pour une double voie, avec une proportion minimum d'un dixième en sus pour les voies de garage et pour les voies supplémentaires des stations, ce serait une dépense de 11.000 fr. par kilomètre, qui se reproduirait tous les dix ans (les traverses étant supposées au nombre de cinq par rail de 5 mètres de longueur) ; si l'on remarque que les chemins de fer sont en général construits par portions successives, que la détérioration ou la conservation des traverses varie beaucoup suivant les circonstances locales, la qualité du bois, etc., et que par suite le renouvellement tend à se répartir également sur toutes les années, au bout d'un certain temps d'existence, on voit que le remplacement des traverses détruites par la pourriture, représente une dépense annuelle d'environ 1.100 par kilomètre. On a dû par suite chercher depuis longtemps à appliquer des moyens de préservation pour prévenir une dépense de renouvellement aussi considérable ; en Angleterre, on a d'abord préparé les traverses ou les longuerines, en les faisant immerger, suivant la patente de Kyan, dans une dissolution de sublimé corrosif. Plus tard on a eu recours aux dissolutions de sulfate de cuivre, puis on a employé la méthode de Payne, qui consiste à placer le bois dans un cylindre en tôle, à le dessécher par l'action de la vapeur, à le soumettre à l'action successive du vide et d'une forte pression pour y faire pénétrer une dissolution de sulfure de barium ou de tout autre sel analogue, et en dernier lieu par l'action combiné du vide et de la pression, du sulfate de fer ou un autre sel qui réagissant sur le premier par voie de double décom-

position, donne un sel insoluble qui reste fixé dans la masse ligneuse; on a reconnu plus tard que ce n'était pas un sel insoluble qu'il fallait chercher à obtenir, mais un sel antiseptique, contraire au développement des vers et de la pourriture sèche, de telle sorte qu'en fin de compte la double décomposition reste plutôt l'enseigne que le principe du procédé, et que son utilité se réduit à celle d'un moyen mécanique énergique pour faire pénétrer les dissolutions métalliques dans les bois durs. Divers autres procédés ont été également employés en Angleterre, mais celui qui paraît actuellement adopté d'une manière à peu près complète est l'emploi de la créosote; on donne ce nom à un mélange d'huiles essentielles fluides, obtenues par distillation du goudron de houille et qui passent pour renfermer une certaine *quantité* de créosote, éminemment favorable à la conservation du bois.

Quel que soit le procédé employé, le bois de chêne ne se prépare qu'imparfaitement, l'aubier seul est pénétré et préservé; c'est déjà un résultat important, puisqu'il permet d'utiliser une plus grande partie de la matière ligneuse et conserve l'enveloppe extérieure dont l'altération contribue peut-être à accélérer jusqu'à un certain point celle du cœur. Les bois résineux et tendres se pénètrent jusqu'à une certaine profondeur variable suivant la nature des procédés; le système Boucherie, qui pénètre entièrement certaines essences lorsque le cœur n'a pas encore durci, ne paraît pas encore avoir reçu d'applications en Angleterre.

La créosote ou le mélange d'huiles qu'on appelle de ce nom pénètre plus ou moins complétement, ordinairement de $0^{m},03$, le bois de sapin employé en morceaux équarris. Deux procédés principaux sont employés pour son application; dans l'un de ces procédés on fait avan-

cer progressivement dans un four très-long, sur de petits chariots, les traverses que l'on veut préparer, et après les avoir amenés très-graduellement, en les faisant passer dans des parties de plus en plus chaudes du four, à un point assez voisin de la torréfaction, on les immerge brusquement dans un bain de créosote ; l'autre procédé présente, pour la disposition de l'appareil, quelque analogie avec celui de Payne; on se sert d'une chaudière cylindrique en tôle de 1m,50 à 1m,80 de diamètre et de 12 mètres de long, dans laquelle sont placés des rails, qui se raccordent avec un petit chemin de fer extérieur, et qui portent une série de petits chariots sur lesquels sont chargés les traverses; la charge entière est introduite dans le cylindre au moyen d'une chaîne, sortant par un trou d'homme percé à l'extrémité du cylindre et s'enroulant sur un treuil; après avoir remis en place la plaque de fonte qui ferme l'embouchure du cylindre, on fait le vide aussi complétement que possible et en même temps on chauffe, au moyen de la vapeur d'échappement de la machine, la créosote déposée dans une bache à côté du cylindre ; lorsque le vide est complet, on ouvre le robinet d'un tuyau qui plonge dans le bain de créosote et celle-ci est refoulée par la pression atmosphérique dans le cylindre; on achève de remplir celui-ci au moyen d'une pompe, et on établit à l'intérieur une pression de 2 atmosphères effectives, en y lançant la vapeur de la chaudière, qui a pour effet en même temps d'entretenir la température du bain ; on maintient la pression pendant quatre ou cinq heures. Ce procédé est assez imparfait, quant à la disposition de l'appareil ; il y aurait certainement avantage à disposer deux cylindres dans lesquels on opérerait alternativement, en faisant passer le liquide de l'un dans l'autre, en établissant la pression au moyen de la pompe

hydraulique seule, et en élevant fortement la température au moyen d'un courant de vapeur qu'on ferait circuler dans un serpentin à la partie inférieure du bain, au lieu de jeter la vapeur au milieu des huiles, pour en séparer ensuite par décantation l'eau de condensation. Quoi qu'il en soit, ce procédé paraît être le plus généralement employé; on reproche au premier de rendre le bois cassant. Le prix de la préparation au moyen de la créosote est de 75 centimes à 1 franc; l'extension même que ce procédé a prise l'a rendu plus coûteux, la production des huiles essentielles de goudron étant nécessairement limitée même en Angleterre; aussi quelques ingénieurs ont-ils substitué à la créosote des sels métalliques tels que le chlorure de zinc, le sulfate de cuivre, ou se sont décidés par ce motif à adopter un des nouveaux systèmes de constructions de voies qui seront décrits plus loin.

En Angleterre, on admet généralement que les traverses en sapin créosotées doivent durer vingt ans au lieu de dix; si cette estimation était exacte, le prix de la traverse étant élevé, par la préparation, à 6 francs, si l'on admet comme plus haut une répartition uniforme du renouvellement sur toute la durée de l'exploitation, ce serait encore une charge annuelle de 660 francs; mais ce ne serait plus que 60 p. 100 de la dépense qu'occasionnerait le renouvellement des traverses de sapin non préparées. Si l'on faisait entrer en ligne de compte les frais de sabotage et de pose, et les frais exceptionnels d'entretien qu'exigent des traverses à moitié pourries pendant la dernière partie de leur existence, l'économie annuelle produite par une bonne préparation devrait être estimée à 50 p. 100 au moins des frais annuels de renouvellement. Il reste seulement à établir par l'expérience si la durée des traverses créosotées sera réellement de vingt années; il peut rester

quelques doutes à ce sujet, si l'on remarque que, malgré une enveloppe extérieure assez épaisse, l'humidité pénétrant par les gerçures de bois, les trous de chevilles, etc., peut à la longue déterminer la pourriture de la partie intérieure non préparée. Quoi qu'il en soit, il y aura toujours un avantage incontestable à préparer les traverses de sapin ou de bois résineux, et la créosote paraît jusqu'ici être le meilleur réactif; il y aura lieu de rechercher en France si les huiles de schiste brutes, ou le résidu plus fixe qu'elles laissent dans la préparation des huiles à brûler, ne pourrait pas la remplacer avantageusement et surtout suffire à une consommation considérable.

En France, on estime à quinze ou seize ans la durée des traverses en chêne; la préparation au sulfate de cuivre sans pression paraît ne pas exercer une influence bien appréciable sur leur durée; l'aubier seul est pénétré et peut être conservé en plus grande proportion dans l'équarrissage. Il y aurait lieu d'essayer si le procédé indiqué en premier lieu pour l'application de la créosote ne donnerait pas des résultats avantageux pour la préparation des traverses en chêne, soit en faisant pénétrer plus avant la matière préservatrice, soit en faisant éprouver au bois une action analogue à celle que subissent les pieux brûlés par le bout; on a fait depuis quelques années des essais de ce genre en Belgique, en carbonisant légèrement et à la superficie les traverses.

Les dés en pierre ne sont pas soumis à une destruction aussi rapide que les supports en bois; en 1849, une enquête ouverte par la compagnie du London et North-Western, établissait que la plus grande partie des blocs posés déjà depuis longtemps était aussi saine qu'au moment de leur mise en place, à l'exception de

quelques cas où l'on avait fait usage de mauvais matériaux ; c'est surtout parce qu'on a changé systématiquement le genre de supports, qu'ils ont été enlevés pour faire place aux traverses.

L'un des défauts les plus marqués des différents systèmes de supports communément employés, surtout en Angleterre, où la vitesse de marche est généralement assez considérable, même pour les trains omnibus et pour les trains de marchandises, est le manque de résistance aux oscillations latérales des véhicules en mouvement. Ces oscillations sont dues à des causes diverses, inhérentes soit à la voie elle-même, soit aux véhicules, soit enfin aux machines locomotives soumises, comme on le sait, à des efforts alternatifs développés par le mouvement même de leur mécanisme, et croissant comme le carré de la vitesse de rotation des essieux moteurs. Les dés en pierre, sans lien entre eux d'un côté à l'autre de la voie, sont exposés particulièrement à subir l'effet de ces causes de perturbation ; aussi a-t-il été nécessaire d'augmenter les dimensions primitivement adoptées pour leur donner une assiette suffisante, et pour prévenir leur déplacement ou leur déversement dans le balast; quelque solide que soit le mode d'attache du coussinet, fixé au moyen d'une cheville en bois dans laquelle est ensuite chassée avec force une cheville en fer, cette pièce prend souvent du jeu sur le bloc et peut, à la longue, y creuser son empreinte, en même temps qu'elle s'use elle-même. On a essayé de prévenir l'élargissement de la voie en plaçant aux joints des pierres transversales; mais outre qu'il est rare de trouver en abondance et à bas prix des pierres d'une longueur suffisante, ces traverses sont exposées à casser et augmentent les difficultés d'entretien. Dans les courbes que les convois fran-

chissent à grande vitesse, les dés en pierre doivent être entretenus avec un soin particulier.

Les rails placés sur longuerines, entretoisées à des intervalles assez rapprochés, par des pièces de bois transversales, appuyées sur toute leur longueur contre un balast fortement damé, résistent mieux qu'aucun des autres systèmes à l'action des causes qui tendent à produire un déplacement latéral; la largeur de la voie ne peut pas s'augmenter d'une manière sensible, comme cela a lieu avec les dés en pierre, si l'entretien n'est pas très-vigilant; mais lorsque le système des rails et des longuerines éprouve une déflexion partielle, soit par le jeu des pièces de bois, soit par l'action des masses en mouvement, il est plus difficile de rétablir la pose dans sa régularité primitive; aussi la voie du Great-Western, dont les machines sont soumises, d'une manière très-marquée, au mouvement de lacet dû à l'inertie des pièces du mécanisme, paraît-elle en général dans un état d'entretien assez médiocre, les rails n'ayant pas cette même rectitude de pose que l'on remarque sur une voie à traverses bien entretenues ou nouvellement posées. Les rails fixés sur les longuerines au moyen de chevilles à crampon ou de vis à bois, sont incessamment sollicités par les actions latérales, et ces attaches tendent à se relâcher ou à s'arracher; toutefois, cette action est moindre que pour les chevilles qui fixent les coussinets sur les traverses ou sur les dés en pierre, malgré l'interposition du coin en bois entre le rail et le coussinet, parce que le rail étant directement posé sur les longuerines et très-bas, le point d'application des efforts latéraux est à une moindre distance de la résistance.

Les traverses subissent d'une manière très-fâcheuse l'effet des mouvements latéraux des véhicules; lors-

qu'une machine ou les waggons d'un convoi sont animés d'un mouvement de lacet très-intense, on voit les traverses se déplacer latéralement et la voie prendre une forme ondulée ; la largeur de la voie reste la même, mais la réaction produite sur les véhicules par les parties rentrantes du rail, entraîné par l'action exercée sur le rail opposé, n'en est que plus marquée. Les chevilles en fer enfoncées dans les traverses, s'ébranlent et prennent du jeu, l'eau s'infiltre dans le bois et l'assemblage perd toute solidité ; les chevilles en bois comprimé ne s'ébranlent pas, mais elles peuvent se couper et se casser, lorsqu'elles ne font pas éclater les traverses. Cet effet est produit surtout par les machines mal équilibrées. Je ne parle pas ici des déplacements latéraux qui peuvent être produits par la dilatation des rails lorsque les joints sont trop serrés ; il vaut mieux avoir un déplacement latéral et une ondulation qu'un déplacement vertical de la voie soulevée en masse et formant pont, comme on l'a observé quelquefois. La voie peut être facilement remise en bon ordre lorsque les traverses ont été déplacées latéralement ; les chevilles peuvent être raffermies par quelques coups de marteau, et au besoin les coussinets peuvent être changés de place lorsque les chevilles sont trop libres, mais les causes qui rendent la réparation simple sont précisément celles qui rendent les dégradations faciles.

On peut remédier facilement aux causes d'instabilité latérale de la voie, et ce ne serait pas là un motif suffisant pour chercher à remplacer les systèmes de supports actuellement en usage. L'expérience a démontré qu'en équilibrant avec soin les pièces du mouvement des machines locomotives, on pouvait supprimer radicalement le mouvement oscillatoire *propre* des machines, qui se transmet directement aux rails par les

roues d'avant et d'arrière, alors même que le frottement de la roue l'empêche de se manifester directement par le choc des boudins contre les rails. La voie cesse donc d'être soumise à ces actions latérales qui se mesurent par des pressions énormes lorsque la vitesse devient très-grande, pressions qui suffisent dans beaucoup de cas pour faire glisser les traverses sur le balast, et qui, dans tous les cas, tendent à arracher les chevillettes des coussinets. L'expérience a démontré, en effet, qu'une application générale de contre-poids convenablement calculés, aux roues des machines d'un même chemin, produisait une amélioration très-marquée dans l'entretien de la voie, et faisait disparaître les déplacements latéraux. On doit conclure de là que si, d'ailleurs, les roues des véhicules étaient entretenues avec beaucoup de soin et mises fréquemment sur le tour, si le parallélisme des essieux était bien maintenu, si enfin le rail avait une forme suffisamment bombée pour ne pas devenir lui-même une cause d'oscillation des véhicules, une voie bien posée, parcourue par des machines rendues très-stables, serait à peu près soustraite aux causes d'altérations latérales qui concourent à faire condamner le système actuel de supports ; je fais abstraction ici des actions que l'on peut appeler longitudinales, et que je vais examiner, qui concourent, en altérant la pose, à développer ou à augmenter au moins les influences latérales. La voie posée sur longuerines acquerrait surtout un caractère de fixité très-marqué, et perdrait à peu près complétement les défauts qu'on peut lui reprocher encore. Les voies sur dés en pierre, que l'on démonte presque partout, deviendraient beaucoup plus sûres et moins coûteuses d'entretien, surtout si l'on ajoutait aux supports de joint des entretoises destinées à maintenir

l'écartement des rails; il est incontestable qu'il y aurait alors avantage à les conserver une fois établis.

En Angleterre, la question de la stabilité des machines n'a jamais été traitée que d'une manière empirique et est restée à peu près sans solution; sur quelques chemins seulement la pratique des contre-poids a pris depuis longtemps un certain développement, mais elle a toujours été basée sur le tâtonnement et est restée insuffisante ; dans quelques cas même elle a été appliquée à contre-sens. La question des altérations latérales de la voie y a donc conservé beaucoup plus d'importance qu'en France ; d'autant plus que la vitesse des convois de toute nature y est plus grande et que l'on a été conduit, par suite, à donner aux pièces motrices des machines des masses plus considérables.

L'action exercée sur la voie par la force centrifuge, qui sollicite les véhicules au passage des courbes de petit rayon, peut être neutralisée, comme on le sait, par un exhaussement convenable du rail placé sur la convexité de la courbe; je ne reviendrai pas sur cette question, que j'ai traitée avec quelque détail dans d'autres circonstances.

Le défaut principal des voies actuelles, spécialement pour les voies posées sur traverses, est la mobilité des joints ; c'est le point le plus faible, celui qui nécessite le plus des améliorations, après toutefois la dépense de renouvellement des traverses. L'origine de ce défaut doit être recherchée surtout dans la flexibilité des rails, qui est augmentée dans une très-forte proportion, lorsque les poids qui la déterminent sont soumis à une vitesse de translation considérable. Ce principe a été indiqué depuis longtemps par M. Minard (*Leçons sur les chemins de fer*, 1834) et par divers auteurs; il est étonnant que ce fait n'ait pas fixé plus tôt l'attention des ingénieurs.

Lorsqu'on suppose une barre de fer, librement posée par les deux extrémités sur deux points d'appui, et qu'on applique un poids successivement sur chacun de ses points, cette barre fléchit et prend la forme d'une courbe, à simple courbure, de forme concave, dont le sommet est toujours très-voisin du milieu de la distance entre les points d'appui; lorsque la charge est précisément au milieu de cette distance, la courbe devient tout à fait symétrique. Si l'on suppose que le corps, au lieu d'être posé successivement en chacun des points de la barre, soit soumis à un mouvement de translation très-lent, les conditions de flexion ne sont pas sensiblement changées; la barre se courbe en restant toujours concave, la flèche augmentant successivement jusqu'à ce que la charge soit arrivée au centre; jusque-là le corps s'est trouvé à chaque instant sur un plan incliné descendant; mais à partir du milieu il se trouve sur un plan incliné ascendant, ou plus exactement à chaque instant il décrit un petit élément d'une courbe, qui tend à le dévier de sa direction; la flexion de la barre pour chacune des positions du poids reste sensiblement ce qu'elle était sous son action statique. Mais si l'on suppose au contraire que la vitesse du corps mis en mouvement devienne considérable, les choses se passent autrement, ainsi que l'ont démontré les expériences des commissaires chargés en Angleterre de faire, en 1839, l'enquête sur l'application du fer à la construction des chemins de fer : « Le résultat général de » ces expériences a été que la flexion produite par une » charge en mouvement sur une barre de fer était plus » grande que celle produite par l'application de la même » charge au repos sur le milieu de la barre, et que cette » flexion augmentait avec la vitesse. Ainsi, par exemple, » quand le véhicule (servant aux expériences) chargé de

» $507^{k},8$ était placé au repos sur une paire de barres » de fer de $2^{m},74$ de long sur $0^{m},101$ de large et $0^{m},038$ » d'épaisseur, il produisait une flexion de $0^{m},015$; mais » lorsqu'on faisait passer la charge sur les barres à la » vitesse de 16 kilomètres à l'heure, la flexion était de » $0^{m},020$, et de $0^{m},038$ à la vitesse de 48 kilomètres à » l'heure ; ce qui, dans ce dernier cas, est plus que le » double de la flexion statique.

» Les expériences ont aussi démontré que lorsque » la charge était mise en mouvement, les points de plus » grande flexion et surtout de plus grande pression ne » restaient pas au milieu de la barre, mais se transpor- » taient vers l'extrémité opposée à celle par où arrivait » le véhicule. Les barres, quand elles étaient brisées » par la charge en mouvement, l'étaient toujours à des » points situés au delà du centre, et souvent en quatre » ou cinq morceaux, ce qui indiquait l'intensité de la » pression qu'elles avaient supportée. »

Ces faits ont une très-grande importance dans les questions relatives à la construction et à l'entretien des voies de chemins de fer ; dans les conditions habituelles du service, dès que la vitesse devient un peu considérable, si les rails ne sont pas rendus très-rigides par leurs dimensions même ou par la nature et la disposition de leurs supports, il suffit qu'ils éprouvent une légère flexion initiale, pour que la pression qu'ils supportent, et par suite la flexion, s'accroissent dans une forte proportion ; c'est d'ailleurs dans la seconde partie de l'intervalle compris entre deux points d'appui consécutifs, dans le sens de la marche, que l'effet se produit. Un rail posé sur des traverses ou des dés en pierre, entre deux coussinets intermédiaires, peut être considéré comme encastré dans ces coussinets au moyen des coins ; si la voie est d'ailleurs en bon état d'entre-

tien, la flexion qu'il peut subir est nécessairement très-limitée, mais il n'en est pas de même aux extrémités; le coin placé dans le coussinet de joint ne suffit plus pour empêcher le bout du rail de subir le déplacement longitudinal extrêmement petit qui correspond à une flexion de quelques millimètres; on voit en effet l'extrémité des rails se relever légèrement lorsqu'on fait passer une machine marchant très-lentement. Ce jeu indéfiniment répété du rail dans le coussinet de joint fait nécessairement desserrer le coin et nécessite des soins particuliers, mais la flexion produit encore d'autres effets beaucoup plus importants.

Le rail en se courbant, lorsque la roue d'un véhicule arrive au joint, ne porte plus que sur l'arête du coussinet et tend à déverser la traverse; lorsque la roue a dépassé le joint, l'effet inverse se produit et la traverse tend à se déverser en sens contraire; la traverse ainsi sollicitée par chacune des roues du convoi, et simultanément à ses deux extrémités, tend à prendre un mouvement d'oscillation autour de son axe, et arriverait en effet promptement à un état de mobilité très-marquée, si l'on négligeait de resserrer fréquemment les coins, et de bourrer le balast sous ses extrémités. Cet effet est rendu très-sensible par l'usure des coussinets et des rails, que l'on observe après un assez long service; chaque bout de rail use la partie correspondante de la table du coussinet de joint ou est usé par elle; les coussinets creusent rapidement leur lit dans les dés en pierre tendre. La *fig.* 1 (Pl. I) indique, sur une échelle exagérée, le mouvement que tend à prendre la traverse en tassant le balast de chaque côté; elle tend à se déverser du côté où le convoi arrive, pour se déverser ensuite de la même manière du côté opposé lorsque la roue qui produit cet effet a dépassé le joint, d'autant

plus que la flexibilité du rail et la vitesse de circulation sont plus grandes, car ces deux circonstances combinées augmentent rapidement la pression totale à laquelle le rail est soumis.

Ce n'est pas là que s'arrête l'effet de cette cause de perturbation. Lorsque le rail a fléchi, et que la traverse s'est déversée du côté où la roue de la machine arrive, on peut considérer cette roue comme étant, jusqu'à la fin de son parcours sur le rail, en mouvement sur un plan incliné. Lorsqu'elle est arrivée à son extrémité, elle tend à continuer son mouvement suivant la direction acquise, et à décrire une parabole tangente à son sommet à l'extrémité du rail qu'elle va quitter. Il en résulte que si la vitesse est suffisante, la roue peut sauter au delà du joint et venir retomber au delà de l'extrémité du rail suivant; en venant tomber sur ce rail elle produit un choc qui détermine encore plus complétement qu'une simple pression le tassement du balast, de telle sorte que dans le mouvement d'oscillation de la traverse, la tendance au déversement est plus grande au delà qu'en deçà du joint. On remarque en effet sur les voies à rails légers dont le balast n'a pas été remanié depuis quelque temps, que les traverses s'inclinent dans le sens de la marche, et que le joint présente par suite un ressaut permanent, comme l'indique la *fig.* 2. Une fois que cet effet, conséquence immédiate de la flexion du rail, a été produit d'une manière sensible, la roue, lancée au delà du joint en vertu de la vitesse acquise sur le plan incliné formé par l'extrémité du rail qu'elle quitte, retombe encore plus loin du joint, et la perturbation va toujours en s'aggravant jusqu'à ce que les poseurs viennent relever les traverses. C'est là ce qui explique comment l'extrémité des rails opposée à la marche des convois est souvent oxydée sur un

ou même plusieurs centimètres de longueur au delà du joint; cette extrémité n'est pas touchée par les roues. C'est également ce qui explique pourquoi la rupture des rails en service a presque toujours lieu près du joint, soit avant par l'excès de pression dû à la flexibilité du rail, soit après par l'effet du choc que produisent les roues en retombant au delà du joint. Il semblerait, en examinant la *fig.* 1, que l'extrémité du rail située au delà du joint devrait être heurtée par la roue lorsqu'elle le franchit; mais le déversement de la traverse est singulièrement exagéré dans cette figure, et de plus, l'élasticité des rails tend à ramener les traverses à leur position habituelle dès que le point d'application de la pression qui produit le déversement se rapproche de l'extrémité du rail qu'il parcourt.

Il peut sembler extraordinaire au premier abord qu'une roue puisse franchir le joint sans toucher l'extrémité du rail qu'elle aborde; mais on peut obtenir par le calcul un aperçu de ce qui doit se passer : si l'on suppose deux rails horizontaux rigides, présentant un ressaut de $0^m,005$ au joint, et que l'on cherche à quelle distance du joint viendra rencontrer le second rail un corps roulant à la surface du premier, avec une vitesse de translation de 20 mètres par seconde (72 kilomètres à l'heure), on trouve, en appliquant les équations connues du mouvement des projectiles, que cette distance est égale à environ $0^m,60$; si la rencontre n'a pas lieu plus loin qu'on ne l'observe dans la pratique, on doit l'attribuer à l'action des ressorts qui ont été comprimés par la réaction du rail infléchi dans l'intervalle qui précède le joint, et qui se débandent dès que la roue cesse de trouver un point d'appui. Le même effet se produit sur l'extrémité du rail qui précède le joint, lorsqu'il y

a une dépression à cette extrémité, par exemple l'usure d'un rail retourné : les roues la franchissent et viennent retomber sur l'autre rail au delà du joint ; il y a même lieu de croire que les roues quittent le rail, même lorsqu'il est en bon état, avant d'arriver à l'extrémité, lancées qu'elles sont par la courbure que le rail a prise et qui, à partir d'un certain point, s'efface, mais sans disparaître entièrement, au fur et à mesure que la roue s'approche de l'extrémité.

En résumant ce qui précède, on voit que lorsque les rails sont flexibles, et ils le sont toujours plus ou moins, leur flexion est augmentée par suite de la grande vitesse de translation dont les convois sont animés ; qu'à la pression due au poids dont les roues sont chargées, s'ajoute la pression qui se développe par l'effet même du mouvement ; que, sous l'action combinée de ces deux pressions, la traverse ou le dé en pierre se déverse du côté où le convoi arrive, pour se déverser ensuite en sens contraire ; qu'à l'origine la flexion du rail, à son extrémité, fait sauter les roues au delà du joint, et qu'il en résulte une série de chocs qui font prendre à la traverse une position permanente inclinée dans le sens de la marche, et qu'enfin cette inclinaison des traverses produit une dénivellation des rails qui aggrave encore l'effet produit par la flexion.

Sur les longuerines, ces causes de dérangement de la voie, qui réagissent d'une manière funeste sur la conservation du matériel roulant, ont des effets beaucoup moins graves ; il peut bien y avoir une certaine flexion du rail appliqué dans toute son étendue sur une pièce de bois compressible et élastique ; il peut y avoir encore un léger ressaut des roues aux joints, mais l'intensité des effets produits, comme celle de leurs causes, est beaucoup moins grande ; aussi la voie sur longue-

rines est-elle beaucoup plus douce et beaucoup moins bruyante que la voie posée sur traverses. C'est là surtout ce qui aurait dû faire préférer les longuerines aux traverses dans l'état actuel des choses.

L'instabilité des traverses de joint se transmet au bout d'un certain temps aux traverses intermédiaires, et la voie exige un remaniement plus ou moins fréquent, suivant les circonstances atmosphériques, des pluies abondantes et une grande sécheresse étant des causes également défavorables pour son maintien. Le matériel roulant est nécessairement usé plus rapidement, par les chocs que les roues éprouvent à chaque joint, que si les rails ne subissaient jamais ni flexion ni dénivellation; c'est là certainement une des causes principales de l'usure rapide des bandages de roues. Il y a en outre, par suite de la déperdition de force vive occasionnée par les chocs répétés indéfiniment, une certaine perte de travail utile; et de plus, la flexion des rails, particulièrement à l'approche des joints, fait naître des résistances au mouvement qui ne sont pas compensées par des impulsions équivalentes. Si la voie est mal entretenue et qu'il y ait dénivellation des supports, si les rails sont très-flexibles, eu égard à l'écartement de leurs supports, il peut se produire encore dans les parties intermédiaires des effets analogues à ceux qu'occasionne la solution de continuité des rails aux joints; la déperdition de la force motrice des convois et la dégradation du matériel roulant, aussi bien que celle de la voie, peuvent alors faire des progrès très-rapides.

Le système de pose sur traverses présente un dernier inconvénient qui lui est propre et qui mérite encore d'être signalé; quelque soin qu'on prenne pour ne bourrer le balast qu'aux extrémités, le tassement occasionné

par la pluie, par la trépidation due au mouvement des convois, peut devenir tel, que la traverse vienne s'appuyer par son milieu sur une couche de balast résistante ; il peut arriver alors que le balast continuant à se tasser graduellement aux extrémités sous le poids des véhicules, et surtout sous celui des machines, la traverse, soutenue par son milieu, se plie en vertu de son élasticité et soit soumise à des flexions alternatives ; chaque extrémité de traverse devient une raquette qui met le balast en mouvement et fait perdre à la voie son assiette ; lorsque cet effet se produit, les diverses causes de perturbation indiquées plus haut manifestent leurs propres effets avec encore plus de facilité. J'ai remarqué en Angleterre quelques parties de chemin où l'on avait ménagé une rigole d'assainissement entre les rails, et où la voie paraissait notablement moins cahotante que dans les parties où les traverses étaient entièrement enfouies dans le balast. Par un temps sec, on voit le balast crevassé, ameubli, et souvent même réduit en poussière aux extrémités des traverses ; et bien que des inégalités de tassement des supports consécutifs combinées avec l'élasticité des rails produise le même effet, on doit souvent l'attribuer à la cause qui vient d'être indiquée. C'est là un inconvénient que ne présente pas le système des dés isolés, et que ne peuvent guère présenter les pièces de bois transversales qui servent d'entretoises aux longuerines ; sa suppression me paraît être un des éléments de succès des différents systèmes de plateaux, réunis par de simples entretoises, que l'on essaye maintenant sur beaucoup de points, tant en Angleterre qu'en France, et qui, s'ils présentent certains défauts plus ou moins graves, ont au moins l'avantage de rendre la voie moins cahotante, d'un entretien plus facile et moins coûteux.

Dans la pensée de quelques ingénieurs fort expérimentés, cette cause de perturbation n'aurait qu'une très-faible importance, parce que dans une voie entretenue par des agents intelligents, il arrive très-rarement que les traverses portent par le milieu; ce témoignage établit mieux que je n'aurais pu le faire l'existence du défaut que je signale dans la voie sur traverses; on peut, à la vérité, y remédier par des soins particuliers, mais il en est de même de la plupart des défauts que peut présenter un système de voie quelconque; on peut y remédier par de l'intelligence et des soins de la part des agents préposés à l'entretien, mais surtout par de la main-d'œuvre et avec de l'argent.

Les moyens actuellement employés ou à l'essai en Angleterre, pour améliorer les conditions d'établissement de la voie de fer, peuvent se classer en trois catégories distinctes : 1° *consolidation du système de voie sur traverses;* 2° *modification du système de supports;* 3° *emploi d'un rail posé sur le balast sans supports.*

Depuis longtemps déjà on avait reconnu empiriquement la nécessité de modifier la répartition des traverses, placées d'abord à des distances uniformes les unes des autres; chaque fois qu'on avait essayé de rapprocher de la traverse de joint les traverses adjacentes, on avait obtenu une amélioration; maintenant on est bien fixé sur les conditions du problème, et quelques ingénieurs anglais, pour remédier à la mobilité du joint résultant de la flexibilité des rails et du défaut d'encastrement à l'extrémité, n'ont pas hésité à réduire de moitié et même plus l'écartement des traverses de part et d'autre du joint, en ajoutant, bien entendu, une traverse par le rail, afin de ne pas augmenter en même temps l'écartement des supports intermédiaires.

M. J. Cubitt, qui achève la construction du Great-Northern, a adopté un rail de $35^{kg},71$ par mètre courant, ayant $5^{m},48$ de longueur et reposant sur sept traverses; les traverses intermédiaires sont espacées de $0^{m},91$ de milieu en milieu, mais celles qui avoisinent le joint n'en sont écartées que de $0^{m},45$, le coussinet de joint étant en outre très-large. Sur le chemin de Waterford and Kilkenny (Irlande), construit à une époque à laquelle le prix du fer était très-élevé (300 francs la tonne), on a adopté un rail de $25^{kg},80$ par mètre courant, en plaçant les traverses intermédiaires à une distance de $0^{m},76$, et en ne laissant qu'un intervalle de $0^{m},38$ entre les extrêmes et celles de joint. La voie du Great-Northern est très-bonne et présente évidemment plus de stabilité que les voies ordinaires; mais si l'entretien journalier est plus économique, les frais d'établissement et ceux de renouvellement des traverses sont augmentés dans la même proportion que le nombre de celles-ci. Ce système est d'ailleurs adopté sur plusieurs autres chemins anglais, où la distance de la traverse de joint aux traverses adjacentes varie de $0^{m},45$ à $0^{m},38$.

Le procédé qui paraît accueilli avec le plus de faveur pour la consolidation des voies posées sur traverses est celui de MM. Samuel et Adams; il consiste à considérer le joint comme une fracture, et à consolider cette fracture au moyen de deux éclisses ou de deux fiches en fonte ou mieux en fer. Ces deux pièces, dont la forme et la disposition sont représentées par la *fig.* 3 (Pl. I), sont légèrement bombées et portent par leurs bords sur le champignon supérieur et inférieur, de telle sorte qu'elles puissent s'appliquer exactement dans toute leur longueur sur les deux rails, sous la pression des boulons qui les réunissent; ces boulons sont

au nombre de quatre pour un joint et traversent la tige du rail. On a soin d'ovaliser les trous percés dans l'un des bouts de rails, à chaque joint, pour laisser libre la dilatation produite par les grandes chaleurs de l'été. Ce système, essayé depuis plusieurs années sur l'Eastern-Counties, a parfaitement réussi, et la plupart des ingénieurs anglais en ont une opinion favorable. La compagnie du Eastern-Counties, après avoir constaté, par sa propre expérience, « que non-seulement ce mode de » consolidation donnait une voie plus douce en rédui» sant en même temps la dépense de traction et l'usure » du matériel roulant, mais qu'il produisait encore une » économie sur les frais d'entretien de la voie, » a décidé, dans son assemblée générale d'août 1851, qu'il serait appliqué sur une longueur de 45 kilomètres, pour laquelle un remaniement général était devenu nécessaire par suite de réparations considérables rendues urgentes par son état de dégradation.

Ce système est évidemment très-efficace, mais il y a lieu de croire qu'en France, si on prend la peine d'en faire l'essai sur quelques kilomètres, on n'hésitera pas à l'employer pour améliorer les voies en service, surtout si par une cause quelconque un remaniement général est devenu nécessaire, soit pour le remplacement des traverses, soit pour le remplacement des rails; on l'appliquerait encore plus avantageusement pour des voies neuves, car on pourrait économiser sur le poids des rails une partie des frais de consolidation du joint.

Le poids des éclisses est très-variable; il dépend de la dimension des rails auxquels on l'applique, de l'écartement des traverses entre lesquelles le joint se trouve compris, mais le plus souvent il paraît fixé arbitrairement par les ingénieurs qui appliquent ce système.

Des éclisses, pour des rails de $41^{kg},66$ par mètre courant, qui pesaient $8^{kg},16$ la pièce, sont réduites maintenant au poids de 6 kilogrammes. Cette dernière dimension, avec boulons de $0^{kg},70$ la pièce, est celle qui a été adoptée récemment par M. R. Stephenson pour le chemin de fer égyptien, à la construction duquel il doit présider; ces poids élémentaires représentent pour un kilomètre, avec rails de 5 mètres,

Éclisses	$9^t,60$
Boulons	$2^t,25$

Sur le chemin de fer du London and North-Western, où l'on s'est préoccupé, comme sur beaucoup d'autres lignes, de cette amélioration, on a fait une estimation des frais de consolidation au moyen des éclisses, en supposant les coussinets de joint remplacés par des coussinets intermédiaires; ramenée au kilomètre de double voie, avec les prix anglais, elle donne en nombres ronds :

	fr.
Éclisses... $8^t,2$ / Boulons... $1^t,4$ } $9^t,5$ à 240 fr.	2.300,00
Forage des trous dans les deux rails	65,00
Pose et dépose des traverses	1.375,00
Somme à valoir	160,00
A déduire : différence sur le poids des coussinets, $4^t,5$ à 100 fr.	450,00
Chevillettes, 325 kil. à 20 fr. les 100	65,00
Prix de revient définitif	3.385,00

Pour appliquer ce système en France sur une voie formée de rails de 5 mètres de longueur, on pourrait admettre le prix de revient suivant :

	fr.
Éclisses, 8 tonnes à 400 fr.	3.200,00
Boulons, $1^t,5$ à 600 fr.	900,00
Forage des trous des rails	100,00
Pose et dépose des traverses	2.000,00
Somme à valoir	300,00
Total	6.500,00

ou, déduction faite de l'économie que l'on réaliserait sur le poids des coussinets de joint qui seraient remplacés par des coussinets ordinaires, et sur l'équarrissage de la traverse de joint. . . . . 6.000 fr.

Cette estimation suppose que l'on remplace les coussinets et les traverses de joint pour les utiliser ailleurs : mais on préférera sans doute, dans la plupart des cas, simplifier les opérations en les conservant pour les employer comme les intermédiaires ; ce sera donc sur une dépense d'environ 6.500 francs par kilomètre de double voie qu'il faudra compter.

En adoptant ce mode de consolidation, il ne sera pas en général nécessaire d'ajouter une nouvelle traverse, à moins toutefois que les rails ne soient trop faibles ou de trop mauvaise qualité pour que l'on puisse augmenter leur portée; il y aura lieu seulement de modifier les écartements relatifs pour réduire de $0^m,50$ à $0^m,60$ l'espacement des deux traverses qui comprendront le joint; des rails de 5 mètres portés sur cinq traverses et pesant 36 à 38 kilogrammes par mètre courant, n'exigeraient pas une nouvelle traverse ; son addition serait au contraire indispensable pour des rails de 30 kilogrammes de $4^m,50$ de long portés sur quatre traverses seulement. Il y a tout lieu de croire que, pour une voie neuve, des rails de 32 à 34 kilogrammes bien fabriqués, réunis au moyen de ce système d'éclisses, remplaceraient avantageusement des rails de 36 à 38 kilogrammes, avec le même écartement moyen de supports; ce serait une économie de 16 tonnes par kilomètre de double voie, ou de 4.000 francs, si l'on compte le prix des rails à 250 francs la tonne; comme on n'aurait pas alors à supporter les frais de remaniement des traverses, estimé à 2.000 francs, l'excédant de dépense de consolidation serait nul, et on profiterait intégrale-

ment des causes d'économie de nature diverse qui résulteraient de l'amélioration des joints.

Il serait très-intéressant que des expériences fussent faites sur nos différents chemins de fer ; on trouverait certainement que l'économie des frais d'entretien doit couvrir à elle seule l'intérêt et l'amortissement à court terme, dans un délai de vingt années par exemple, des frais de premier établissement, on ne devrait pas hésiter à faire l'application générale de ce système de consolidation, car il produit certainement une économie sur l'entretien du matériel et sur les frais de traction, en même temps qu'il rend la voie moins bruyante, moins cahotante et plus sûre. On aurait à examiner cependant si l'addition d'une traverse supplémentaire, comme l'ont fait M. J. Cubitt et divers ingénieurs, pour diminuer la flexion du rail à son extrémité, ce qui entraînerait dans beaucoup de cas une dépense moins considérable, ne suffit pas pour produire en grande partie le résultat désirable. Pour des voies en service, il y aurait, dans l'un et l'autre cas, à faire un remaniement général des traverses ; la comparaison devrait donc être établie seulement entre le prix de fourniture des matériaux employés et leur durée probable. C'est une question, je le répète, sur laquelle il serait désirable que des expériences très-complètes fussent faites dans des circonstances variées.

Les joints à éclisses sont employés sur une grande échelle et avec beaucoup de succès en Allemagne ; pour les rails américains, on emploie des éclisses en forme de cornières qui embrassent la base du rail et forment coussinet de joint ; on n'est pas alors obligé de mettre le joint en porte à faux.

La seconde catégorie de systèmes proposés pour l'amélioration de la voie actuelle, comprend un assez grand nombre de dispositions différentes. Une seule

paraît avoir été l'objet d'expériences faites sur une grande échelle, c'est la seule que je m'attacherai à décrire avec quelque détail, après avoir fait connaître succinctement le principe des autres.

On a essayé de supprimer les coins en fabriquant des coussinets dont les deux mâchoires réduites à une faible largeur, ne sont pas opposées l'une à l'autre, et se projettent, l'une à droite, l'autre à gauche de l'axe du coussinet, leurs surfaces de contact étant légèrement bombées ; on enfile ces coussinets sur le rail avant la pose, et avant de les fixer sur la traverse on les fait obliquer légèrement pour établir le contact des mâchoires; le coussinet de joint est d'une forme assez compliquée, et comprend une clavette posée à plat destinée à rendre solidaires les deux bouts de rails contigus. Ce système a été essayé sur un kilomètre et demi de longueur sur le chemin de North-Staffordshire ; on en est content, mais on paraît disposé, en l'appliquant sur une plus grande échelle, à conserver le coussinet de joint ordinaire avec coin en bois.

M. Samuel, qui est l'inventeur du système de consolidation du joint à éclisses, a imaginé également d'autres dispositions qui ont pour objet d'améliorer la pose des voies, mais qui exigent la modification ou le changement complet du système de supports. En premier lieu il a proposé de remplacer le coussinet de joint, sans toucher aux coussinets intermédiaires, par un coussinet à une seule joue extérieure, qui épouse exactement la forme du rail ; cette joue se développe de part et d'autre du joint sur une longueur d'environ $0^{m},20$, et elle est reliée avec une éclisse en fer appliquée sur les deux bouts de rails à l'intérieur de la voie, au moyen de quatre boulons ; ce système n'est qu'une modification du joint à éclisse, qui a l'avantage d'éviter le dé-

placement des traverses, mais il paraît présenter peu de solidité. Pour appliquer ce système d'une manière complète et supprimer les traverses, M. Samuel adopte des plateaux en fonte de $0^m,90$ de long sur $0^m,35$ de large, consolidés inférieurement par une nervure longitudinale et par des nervures transversales qui les fixent dans le balast, et portant, sur une grande partie de leur longueur, une joue extérieure sur laquelle s'applique le rail; à l'intérieur le rail reçoit également une éclisse en fer, fixée au joint par quatre boulons, et dans la partie intermédiaire par deux boulons seulement. Ces supports en fonte sont écartés de milieu en milieu de $1^m.52$, de telle sorte que pour un rail de $4^m.57$ il n'y a que deux supports intermédiaires. Les supports opposés sont réunis deux à deux par une entretoise en fer fixée par un rivet sur le bord de chacun d'eux. Une dernière invention de M. Samuel consiste à adopter un support en fonte en forme de V, à larges bords, tronqué à la pointe, et consolidé par des nervures transversales très-saillantes; le rail est logé dans la cavité de ce V au moyen de deux coins très-allongés dont le profil intérieur, dressé à la machine, épouse exactement la forme du rail, et dont la surface extérieure s'incruste dans des stries tracées sur la face correspondante du support en fonte; le rail et les deux pièces de bois forment un coin que la pression des roues serre et consolide de plus en plus. L'emploi de ces supports est combiné avec celui du joint à éclisses. Ces supports, au nombre de trois seulement pour chaque rail de $4^m,57$, sont réunis deux à deux par des entretoises en fer. Le poids des supports en fonte, pour ce dernier système, est de 77 tonnes par kilomètre de simple voie, et pour le précédent de 82 tonnes. Ces divers systèmes ne paraissent pas avoir été essayés sur une échelle importante et sont

inférieurs à celui de M. P. Barlow, dont je parlerai plus loin.

M. Hoby de Glascow a pris un brevet pour un système qui présente de l'analogie avec le dernier système de M. Samuel; il se compose de supports en fonte en forme d'U à larges bords, consolidés inférieurement par des nervures; la face intérieure de l'U est contournée de manière à épouser la face correspondante du rail, l'autre est évasée à la partie inférieure pour donner prise au coin qui fixe le rail; on emploie deux coins par support, et on réunit deux à deux les supports au moyen d'entretoises en fer.

MM. Adam et Richardson ont pris une patente pour un système qui présenterait l'avantage d'une grande simplicité, s'il était susceptible de résister aux actions latérales que la voie subit; le champignon inférieur du rail ordinaire, et les deux tiers de sa tige sont encastrés entre les deux parties d'une pièce de bois refendue dans le sens de sa longueur, et travaillées sur une machine spéciale qui a enlevé le bois dont le métal doit occuper la place; ces deux parties sont ensuite rapprochées et fixées par des boulons, passant au-dessous du rail. Ces pièces de bois peuvent être discontinues et former un système intermédiaire entre celui des longuerines et celui des supports en fonte isolés; le joint à éclisses est son complément nécessaire.

Un autre système de supports en fonte, que tout le monde a vu à l'exposition, et qui a fixé l'attention de plusieurs personnes, a pour objet de remplacer les dés en pierre; il a été breveté au nom de M. Greave; ces supports sont disposés en forme de cloche hémisphérique, et portent à la partie supérieure un coussinet venu de fonte, dans lequel le rail est assujetti au moyen d'un coin en bois comprimé, combiné avec un

système de cales en fer ; la joue intérieure du coussinet de joint à 0m,406 de long, et la joue extérieure sur laquelle s'applique le coin a 0m,152. Ce qui caractérise ce système est la disposition particulière adoptée pour faciliter le relevage de la voie ; la table, qui surmonte la cloche et qui porte les joues du coussinet, est percée d'un trou, par lequel on introduit du sable, que l'on refoule avec la tête d'une pince en fer, de manière à relever le support à son niveau normal, sans avoir besoin de fouiller le balast. Ces supports ont en partie les défauts des dés en pierre, ils ne leur paraissent préférables que sous le rapport de l'entretien journalier ; encore faudrait-il pour cela que la position qu'occupe le trou destiné à l'introduction du sable fut changée, car telle qu'elle est placée, du côté intérieur du rail, il doit y avoir nécessairement déversement du support à l'extérieur par l'effet du bourrage. Il y a lieu de croire d'ailleurs que le bourrage ainsi fait serait dans tous les cas fort insuffisant, et que la disposition spéciale adoptée par l'auteur ne servirait dans la pratique qu'à remplir la cloche, relevée d'ailleurs à la pince comme un support ordinaire. Les pièces de joint sont reliées entre elles par des entretoises en fer.

Le système de supports en fonte qui a reçu les applications les plus étendues en Angleterre, est celui de M. P. Barlow, ingénieur en chef du South-Eastern, qui l'a fait adopter par sa compagnie pour le renouvellement des voies anciennes et, pour la construction des voies nouvelles, sur les lignes d'embranchement. Les supports sont de deux espèces, pour les joints et pour les parties intermédiaires ; chacun est composé de deux parties, réunies par des boulons, et portant des oreilles semblables à la joue intérieure des coussinets ordinaires, entre lesquelles les rails se trouvent ser-

rés comme entre les mâchoires d'un étau (*fig.* 4). Les supports de joint portent trois systèmes d'oreilles ou mieux trois coussinets, celui du milieu très-large ; les supports intermédiaires n'en portent que deux ; la longueur des premiers est de $1^m,30$, celle des derniers de $0^m,99$; les supports de joint sont réunis d'un côté à l'autre de la voie par des entretoises en fer d'angle, rivés sur le bord intérieur de chaque plateau ; pour un rail de $4^m,57$ il y a deux supports intermédiaires. Les voies construites sur ce système sont, suivant M. P. Barlow, plus économiques pour les frais de premier établissement, pour l'entretien de la voie, pour la traction et l'usure du matériel, et surtout pour le renouvellement ; après avoir estimé d'abord la durée de ses supports en fonte à vingt années, il la porte dans ses derniers rapports à trente années. Les ingénieurs anglais paraissent en général peu partisans de ce système ; ils préfèrent pour consolider les voies actuelles le joint à éclisses, et, pour établir les voies nouvelles, le système de M. W. Barlow, frère du précédent et ingénieur du Midland, système qui consiste à poser sur le balast, sans intermédiaire de supports, un rail en forme de V renversé à très-large base. Il est constant néanmoins que ce mode de supports en fonte, par cela même qu'il donne une fixité à peu près complète au joint, doit réduire considérablement les faits d'entretien journalier de la voie ; il donne plus de surface utile pour l'assiette des rails sur le balast, et n'a pas l'inconvénient que présentent les traverses, lorsqu'elles viennent s'appuyer sur le balast par leur milieu ; il a en outre l'avantage d'une solidarité partielle entre les points d'appui dans le sens longitudinal ; on peut lui reprocher, comme à tous les systèmes, dans lesquels disparaît l'usage du bois, de rendre la voie trop rigide et de nuire par son défaut

d'élasticité à la conservation du matériel, mais ce défaut est certainement compensé par la fixité donnée au joint, et par la facilité d'entretien de la voie; le balast lui-même, à moins qu'il ne soit en pierres cassées, paraît avoir une sorte d'élasticité qui compenserait, jusqu'à un certain point, la trop grande rigidité des supports. La véritable objection que l'on peut faire à ce système, c'est la fragilité de la fonte employée sans intermédiaire élastique entre le rail et le support; cette objection est grave au point de vue de l'entretien et au point de vue des accidents; les conséquences d'un déraillement pourraient devenir beaucoup plus sérieuses, sur une voie dont les supports seraient brisés avec une grande facilité par les roues des machines et des wagons, que sur une voie ordinaire. C'est un point sur lequel l'expérience pourra seule prononcer; mais il faudrait pour cela qu'elle fût faite dans des conditions moins exceptionnelles, moins favorables au succès du système, qu'elles ne le sont entre les mains de son inventeur.

La fixité du joint, dans ce système, est une chose incontestable, ainsi qu'on le reconnaît en faisant passer à plusieurs reprises une machine sur un joint; elle résulte de ce que le rail est encastré entre les deux oreilles du coussinet de joint comme dans un étau, et en outre de ce que les points d'appui adjacents, placés sur le même support, sont à une petite distance du joint. Ce système peut être appliqué uniquement pour consolider les joints, en conservant les traverses intermédiaires; mais les personnes qui ont l'expérience des supports en fonte et M. P. Barlow lui-même, ne recommandent pas ce mélange, qui rend la voie inégale, alternativement élastique et rigide.

M. W. Barlow est inventeur d'une espèce de sup-

ports en fonte qui tient le milieu entre le système de son frère et celui de Greave ; ces supports sont en fonte d'une seule pièce, en dos d'âne, creux et portant trois coussinets venus de fonte pour la pièce de joint et deux seulement pour les parties intermédiaires ; les rails, de forme ordinaire, sont fixés dans ces coussinets au moyen de coins en bois ; le joint est encore consolidé par une sorte de clef en fer appliquée par le coin contre les naissances des champignons inférieur et supérieur, pour gêner le jeu des bouts de rail, mieux que ne le ferait un simple coin compressible.

M. P. Barlow avait déjà posé au mois de mars 1851, sur le South-Eastern, 98 kilomètres de simple voie. Il calcule comme suit le prix comparatif de la double voie, établie soit suivant son système, soit sur traverses, avec cinq traverses par rail ; la longueur du rail est de $4^m,57$ dans les deux cas ; les calculs ont été ramenés au kilomètre :

Voie sur traverses.	fr.	*Voie du système P. Barlow.*	fr.
Rails, $160^t,30$ à $133^f,75$ l'une.	21.441,60	Rails, $136^t,73$ à $133^f,75$ l'une.	18.283,50
Traverses créosotées, 2.186 à 5 fr.	10.935,95	Supports en fonte, $174^t,62$ à $109^f,375$.	19.033,45
Coussinets, 56 t. à $106^f,25$. .	5.941,75	Boulons et écrous, $5^t,59$ à 425 fr.	2.375,75
Chevillettes, 9.624 à $0^f,156$. .	1.438,65	Entretoises, $2^t,50$ à 200 fr. .	500,00
Coins, 4.376 à $0^f,156$.	683.50	Balast, 2.858 m. c. à $2^f,452$.	6.990,30
Balast, 4.751 m. c. à $2^f,452$.	11,650,50		
Total.	52.091,95	Total.	47.183,00

D'après ce compte, l'économie serait de $4.908^f,95$, soit environ 10 p. 100 en faveur du nouveau système. Cette différence est obtenue en réduisant le poids du rail, ce qui est justifié jusqu'à un certain point par la fixité donnée au joint et par le moindre écartement des points d'appui qui sont au nombre de sept par rail de $4^m,57$ de longueur, savoir : trois pour le support de joint et quatre pour les deux supports intermédiaires, et en ré-

duisant de 40 p. 100 la quantité de balast, ce qui est moins justifié, au moins dans une aussi forte proportion. En France, où le prix du fer et de la fonte est au moins de 50 p. 100 supérieur à celui que l'on paye en Angleterre, les traverses en chêne, durant au moins quinze années, sont à peu près au même prix que les traverses créosotées en Angleterre, le rapport serait renversé, et la voie à supports en fonte, établie dans les mêmes conditions, coûterait au moins 6 à 7.000 francs de plus par kilomètre de double ligne que la voie établie sur traverses; elle coûterait encore plus cher que la voie ordinaire avec joint consolidé au moyen d'éclisses, si l'on profitait également pour celle-ci de la faculté de donner un moindre poids au rail.

Pour les frais de renouvellement d'une voie dont les rails seraient encore en bon état, les traverses seules, étant hors de service, M. P. Barlow a estimé les frais d'acquisition des matières premières, la pose étant estimée à un prix égal de part et d'autre, de la manière suivante :

Par kilomètre de double voie :

	fr.
Voie sur traverses.	19.000,00
Voie du nouveau système. . .	18.347,20
Différence.	652,80

ou environ 3 1/2 p. 100. Mais pour arriver à ce résultat, il a supposé que les coussinets et les chevillettes seraient entièrement à renouveler; l'avantage de son système, pour restaurer une voie dont les rails sont encore en état de service, et dont les coussinets seraient encore, en grande partie, susceptibles d'être employés, se réduit donc même en Angleterre à rendre la voie plus solide et d'un entretien moins dispendieux. En France, les frais de renouvellement des supports, par l'emploi du sys-

tème Barlow, serait beaucoup plus coûteux que le simple remplacement des traverses.

M. Barlow estime que l'entretien de la voie du South-Eastern sur traverses, pour la ligne principale, coûte 1 242f,70 par kilomètre et par an, et que l'emploi de son système réduira la dépense à 776f,70 ; il pense que les frais de renouvellement, par suite de la durée même de ses supports et de la réaction salutaire que produit leur usage sur la conservation des rails, seront réduits dans une proportion encore plus grande. En admettant même que les frais de premier établissement, combinés avec les frais de renouvellement par usure, fussent notablement plus faibles pour le système de P. Barlow que pour le système ordinaire, il serait difficile, dans l'état actuel des choses, de donner un conseil relativement à son application en France. L'expérience faite en Angleterre, quoique sur une grande échelle, n'est pas assez contradictoire ; la question de la rupture accidentelle des supports reste dans le doute ; si cette cause de dégradation n'a pas d'importance, contrairement à l'opinion de plusieurs ingénieurs, cela peut dépendre surtout de la qualité des fontes d'Écosse employées à leur fabrication ; les essais de plateaux faits jusqu'ici en France sont, d'ailleurs, peu encourageants. Sous ce rapport, il serait utile que des expériences fussent faites sur une assez grande longueur de chemin, en vue de déterminer la durée probable de ces supports, et surtout d'établir le prix de l'entretien en opposition avec celui des voies actuelles. Il y a lieu de croire qu'en faisant entrer en ligne de compte tous les éléments de la question, les frais de premier établissement, la durée, les frais de remplacement accidentel et de renouvellement périodique, et enfin la dépense d'entretien, en laissant même de côté la question de conservation des rails et du matériel,

en faisant, en un mot, un compte de capital, d'intérêts et d'amortissement, on trouverait un avantage en faveur du système de M. P. Barlow sur le système actuel des traverses, l'entretien journalier pouvant compenser le surcroît des frais de premier établissement ; mais il faudrait faire le même compte pour les systèmes qui ont uniquement pour objet de consolider le joint, soit par l'addition d'une traverse supplémentaire, pour soutenir les bouts de rails très-près du joint, soit par l'emploi du joint à éclisses de Samuel; selon toute apparence, l'avantage ne resterait pas aux supports en fonte.

Je n'essayerai pas ici de faire ces calculs dont les éléments sont incertains et dépendent de circonstances très-variables ; chacun pourra les faire à son point de vue particulier.

On ne paraît pas avoir essayé en Angleterre le système de M. Pouillet, qui consiste à placer les coussinets ordinaires sur les extrémités d'une mince traverse en bois reposant sur deux larges plateaux en bois enfouis dans le balast. Ce système réussit très-bien depuis plus de deux années sur les chemins de fer du Nord et de l'Ouest ; il rend la voie plus douce, plus régulière et beaucoup moins dispendieuse d'entretien. En Angleterre, où la fonte est à très-bon marché et où le bois dur est rare, il n'y a pas lieu de croire que ce système puisse obtenir le succès qui peut lui être réservé en France ; mais il serait, sans doute, opportun d'y faire l'essai d'un système mixte qui se composerait de plateaux en fonte surmontés d'une traverse mince créosotée, destinée seulement à servir de siége élastique à un coussinet en fonte et d'entretoise aux deux cours de rails. On est même autorisé à penser, en consultant l'exemple des voies posées sur dés en pierre ; et sur les

supports en fonte des divers systèmes décrits plus haut, qu'une seule entretoise aux plateaux de joint suffirait pour maintenir l'écartement de la voie, surtout si les machines étaient amenées au degré de stabilité qu'exige leur propre conservation.

Le peu de succès qu'ont obtenu jusqu'ici en France les supports en fonte paraît dû surtout à ce que le prix élevé de cette matière, joint à un défaut de qualité, n'a pas permis de leur donner des dimensions suffisantes et toute la solidité nécessaire ; en donnant à l'assemblage du coussinet et du plateau l'élasticité qui lui manque, par le procédé qui vient d'être indiqué, on arriverait peut-être à un résultat plus favorable. En adoptant un large coussinet pour le joint, et en rapprochant les supports adjacents, comme on le fait pour les traverses en Angleterre, ou en employant le joint de Samuel et Adams, on réaliserait la plupart des améliorations que l'on recherche au point de vue de l'économie de premier établissement, de la durée et de l'économie de l'entretien. C'est un point sur lequel il serait également utile de faire des essais.

M. William Barlow, ingénieur du Midland, a pris la question de plus loin, et a imaginé une solution radicale pour remédier aux défauts des supports actuels ; il a pensé qu'en adoptant le rail en U renversé de M. Brunel, et en augmentant son poids pour élargir sa base, on arriverait à pouvoir le poser directement sur le balast sans employer l'intermédiaire de longuerines. Ce système paraît destiné à un grand succès en Angleterre ; il est approuvé ou adopté par un grand nombre d'ingénieurs expérimentés, et il y a tout lieu de croire qu'avant peu de temps, il servira exclusivement pour la construction des nouveaux chemins de fer.

La *fig.* 5 (Pl. 1), indique la forme à laquelle est ar-

rivé maintenant M. W. Barlow après divers tâtonnements.

La largeur du rail à la base est d'environ $0^{m}.30$, et la hauteur est de $0^{m}.13$; le poids actuellement adopté est de $39^{kg},68$ à $44^{kg},64$ par mètre courant pour les embranchements, et de $49^{kg},60$ à $54^{kg},56$ pour les lignes à grand trafic. Les barres ont $5^{m},49$ à $6^{m},70$ de longueur, et sont réunies bout à bout par une selle en fer laminé épousant intérieurement la forme du rail, et fixée par quatre rivets sur chaque bout de rail; deux de ces rivets prennent une entretoise en fer d'angle destinée à maintenir l'écartement de la voie : cette entretoise est légèrement infléchie à chaque extrémité pour fixer l'inclinaison des rails. Tous les $91^{m},44$, les trous de rivet sont ovalisés de 5 millimètres pour permettre le jeu de la dilatation : celle-ci doit, du reste, être peu considérable pour des pièces de métal presque entièrement enfouies dans le balast. M. W. Barlow avait d'abord réuni ses rails au moyen de selles en fonte et de coins en bois; mais l'emploi de selles en fer laminé est désormais adopté d'une manière générale. Les avantages de ce rail sont l'économie des frais d'entretien journalier que M. W. Barlow estime à 50 p. 100 des frais ordinaires, la simplicité du système, la stabilité de la voie et la fixité des joints, et, pour l'Angleterre, où le prix du fer est très-peu élevé, l'économie des frais de construction de la voie; il faut y ajouter, comme pour les systèmes perfectionnés, l'économie d'entretien du matériel roulant et des frais de traction. On pourrait supposer qu'une voie de cette nature manque complétement d'élasticité, mais la forme du rail lui donne une certaine élasticité qui s'ajoute à celle du balast, et dans tous les cas, si l'élasticité n'est pas aussi grande qu'on pourrait le désirer au contact de masses métalliques en mou-

vement, on trouve une compensation dans la régularité que la voie conserve dans la pose et dans la fixité du joint. A côté de ces avantages se trouvent quelques inconvénients, entre autres, la difficulté d'assurer l'écoulement des eaux, lorsque le balast est argileux, la nécessité de changer les rails quand le champignon est entamé, la difficulté de pose que présente l'emploi des rivets, dont la moitié doit être mise sur place, et enfin le poids des rails dont la manœuvre exige des équipes composées d'un plus grand nombre d'hommes; enfin, les rails de cette forme, à poids égal, sont plus coûteux de fabrication que les rails ordinaires, même en Angleterre, où les usines possèdent de puissants moyens de fabrication, le surcroît de prix est d'environ 12 francs par tonne.

M. W. Barlow établit, de la manière suivante, le prix comparatif de 1 kilomètre de double voie de son système et du système ordinaire sur traverses, les frais de pose et de balast étant les mêmes de part et d'autre.

Voie ordinaire avec rails de 39k.,68 par mètre courant. (Rails de 4m,57 avec cinq traverses.)	fr.	*Voie du systême W. Barlow.* (Rails de 54 kilog. par mètre courant.)	fr.
Rails, $155^{t},9$ à $141^{f},85$ la tonn.	22.114,40	Rails, $211^{t},18$ à $162^{f},50$ l'une.	34.316,75
Coussinets, $55^{t},9$ à 100 fr. .	5.590,00	Selles de joint à $33^{f},10$ l'une.	3.836,90
Traverses de joint.	2.664,10	Entretoises.	911,75
— intermédiaires. .	9 904,50	Matériaux divers pour ja pose.	895,65
Chevillettes, $3^{t},72$ à 200 fr. .	744,00		
Coins, 4,592.	574,20		
Total.	41.591,20	Total.	39.960,45

Cette comparaison, qui suppose les frais de balast, de main-d'œuvre de pose, etc., égaux, fait ressortir un avantage assez faible en faveur du nouveau système ($1.630^{f},75$ par kilomètre); mais depuis l'époque à laquelle elle a été faite, une réduction notable a eu lieu dans le prix des nouveaux rails; en supposant que la différence soit exactement $12^{f},50$ par tonne entre les rails

ordinaires et les rails Barlow, on obtiendrait une nouvelle différence de 1.716f,10, ce qui donnerait pour la mesure de l'avantage comparatif, en y ajoutant encore une économie de balast que l'on peut évaluer raisonnablement à 1/6 ou 700 mètres cubes, soit à 2f,50 l'un, 1.750 francs par kilomètre de double voie, un total de 5.096f.85.

En somme, l'avantage serait, d'après ce calcul, de 12 p. 100 pour l'Angleterre. En France, l'économie des frais de premier établissement de ce système, qui remplace le bois par du fer laminé, serait à peu près nulle dans la plupart des cas. La comparaison devrait surtout s'établir sur les chances de durée et sur l'économie des frais d'entretien ; de ce côté, l'avantage ne serait pas douteux, s'il était bien démontré que les rails nouveaux ne sont pas exposés à des chances de destruction plus graves que ceux du système actuel.

L'importance des applications que le système Barlow a déjà reçues en Angleterre peut se mesurer par l'importance des commandes qui avaient été déjà faites, à la fin de juillet 1851, à l'usine qui fabrique les rails ; elle s'élevait à 23.000 tonnes, représentant un développement d'environ 104 kilomètres de double voie.

Dans le cas où l'on aurait à discuter l'application du système W. Barlow en France, il est une question à laquelle on ne saurait attacher trop d'importance, et qui n'a pas pu encore être jugée par l'expérience, c'est la question de la dégradation par écrasement, laminage ou déchirure; on ne saurait dire, dès à présent, jusqu'à quel point la rigidité et la forme des rails, qui tendent à s'ouvrir sous le poids des machines, ne réagira pas d'une manière fâcheuse sur leur conservation ; il est également impossible de dire si les rivets des joints ne se relâcheront pas assez promptement, et s'il n'y aura

pas là une source de dépense appréciable pour l'entretien au bout d'un certain nombre d'années ; enfin, il y a lieu de croire que cette voie sera un peu moins favorable à la conservation du matériel qu'une voie placée sur supports élastiques.

MM. Liddell et Gordon, ingénieurs du chemin de fer projeté de Newport, Abergavenny et Hereford, dans le pays de Galles, ont motivé, dans les termes suivants, le choix qu'ils ont fait faire par leur compagnie du système de M. William Barlow :

« Nous vous proposons d'adopter pour votre chemin » de fer le rail de M. W. Barlow, du poids de 49kg,60 » par mètre courant.

» Si le rail de forme ordinaire devait être préféré, » nous vous recommanderions d'adopter un rail de » 41kg,65 par mètre courant, avec joints à éclisses, sur » coussinets pesant 11kg,10, fixés sur traverses créosotées, ayant aux joints 2m,75 de long et un équarrissage » de 0m,30 sur 0m,15, et pour les points intermédiaires, la même longueur et 0m,25 sur 0m,13 d'équarrissage.

» Les frais d'établissement d'une voie semblable se» raient d'environ 47.000 fr. par kilomètre de double » voie, conformément au détail ci-après :

	fr.
» Rails, 166t,60.	22.545,00
» Coussinets, 44t,40.	6.140,00
» Traverses créosotées, 2.188. .	12.307,00
» Coins et chevillettes.	1.139,00
» Pose.	2.050,00
» Consolidation des joints. . . .	2.734,00
Total.	46.915,00

» Les frais d'établissement comparatifs de la voie de » W. Barlow seraient :

		fr.
» Rails.	195 tonnes	
» Plaques de joint	25	
» Entretoises.. . .	10	
» Total. . . .	230 tonnes à 162^f,50 l'une.	37.375,00
» Pose.		2.050,00
» Total.		39.425,00
» Soit en moins.		7.480,00 »

Ces deux ingénieurs estiment ensuite les frais d'un renouvellement complet de chaque système de voie au bout de quinze années, et trouvent :

1° *Pour la voie ordinaire :*

	fr.
Remplacement des rails, 166^t,60 à 62^f,50 la tonne. .	11.412,50
— des coussinets, 44^t,4 à 50 c.	2.220,00
— des pièces de joint.	683,50
Pose.	1.025,00
Remplacement des traverses.	12.307,00
Total.	26.648.00

2° *Pour la voie de W. Barlow :*

Rails.	195 tonnes	
Plaques de joint. .	12^t,5	
Entretoises	5	
Total. . . .	212^t,5 à 75 fr. l'une.	15.937,50

La main-d'œuvre de renouvellement se confond, dans ce dernier cas, avec celle d'entretien, de telle sorte que la différence, à l'avantage du système de W. Barlow, est de 10.710^f,50.

Enfin, MM. Liddell et Gordon estiment les frais d'entretien annuels, pour la voie sur traverses, à 930 francs par kilomètre et par an, et pour le nouveau système, à 620 francs seulement. Avec ces données, on peut faire le compte de la dépense annuelle totale propre à chacun de ces systèmes, en admettant que le renouvellement

ait lieu d'une manière uniforme pour chacune des quinze années, on a :

	Voie sur traverses.	Voie de M. Barlow.
Intérêt à 5 p. 100 du capital de	fr.	fr.
1er établissement.	2.345,75	1.971,25
1/15 des frais de renouvellement.	1.776,55	1.062,50
Entretien annuel.	930,00	620,00
Total.	5.052,30	3.653,75
Différence annuelle.	1.398,55	

Il ne paraît pas que l'établissement des croisements et des changements de voie soit une difficulté insurmontable dans ce nouveau système; on voit à l'exposition une solution qui paraît satisfaisante; mais, lors même que la forme du rail ne s'y prêterait pas, rien ne s'opposerait à ce que l'on conservât le mode ordinaire de construction de la voie dans les stations.

La conclusion la plus certaine que l'on puisse tirer des faits que l'on observe maintenant en Angleterre, c'est qu'une prompte réforme des moyens employés jusqu'ici pour la pose des voies est devenue indispensable. Dans ce pays, pour les voies neuves, le rail sans support, de M. William Barlow, paraît devoir être appliqué, d'une manière à peu près générale, pour les nouvelles constructions; pour les voies existantes, si les traverses sont encore en bon état de service, le joint à éclisses de Samuel aura certainement une préférence marquée, surtout si les voies auxquelles on l'appliquera ont des rails solides, et s'il n'est pas nécessaire de suppléer à leur défaut de solidité par l'addition d'une traverse supplémentaire; dans ce dernier cas, on verra, peut-être, quelques ingénieurs se contenter, comme l'a fait M. J. Cubitt, de renforcer le joint par le rapprochement des traverses adjacentes. Si les traverses sont

hors de service, et qu'en même temps, les coussinets aient besoin d'être renouvelés, les rails seuls pouvant être conservés, le système de M. P. Barlow pourra être adopté; mais il y a lieu de croire que ce ne sera qu'avec une certaine hésitation, et que, dans beaucoup cas, on aura de nouveau, nonobstant l'inconvénient de la prompte destruction du bois, recours aux traverses avec joint consolidé, si l'on ne profite pas du prix peu élevé auquel les usines remplacent les vieux rails, poids pour poids (5o à 6o francs la tonne), pour adopter le rail sans support de M. W. Barlow. Quant aux voies sur longuerines du Great-Western, elles seront conservées dans leur état actuel, à moins que la nécessité d'un renouvellement général de portions importantes de la ligne ne donne lieu à l'adoption du rail sans supports dont M. Brunel se montre très-partisan. Les dés en pierre pourront être conservés là où ils existent, si les ingénieurs anglais cessent de rester en arrière, comme ils l'ont fait jusqu'ici, sur la question de stabilité; mais il n'est pas probable que de nouvelles voies soient établies suivant ce système.

En France la question ne peut pas être résolue comme en Angleterre, où l'on remédie aux défauts du système actuel en remplaçant le bois par le fer; il est possible que tout compte fait il y ait avantage dans la construction des voies neuves à remplacer les traverses par des supports en fonte, ou à adopter le rail de M. W. Barlow, mais la question est douteuse, et quelques années d'expériences bien faites seraient utiles pour établir les conditions de durée des uns et des autres, pour permettre d'apprécier quelle influence cette durée peut exercer sur les frais de renouvellement et l'importance qu'il convient d'attribuer à cet élément dans la balance générale des avantages et des inconvé-

nients. Cependant on peut admettre dès à présent que toutes les fois qu'une voie sera construite avec des rails légers, de 30 kilogrammes par exemple, même lorsque les traverses seront encore en bon état et qu'il faudra en faire le remaniement pour l'application du joint à éclisse de Samuel, on devra l'appliquer sans hésitation pour réduire les frais d'entretien et arrêter la dégradation du matériel fixe et roulant qui est la conséquence de la mobilité du joint. Il en sera de même à plus forte raison lorsque, les rails et les coussinets étant encore en bon état, il faudra remplacer les traverses ; il en sera de même encore lorsqu'on se verra dans l'obligation d'ajouter une cinquième ou une sixième traverse à des rails trop faibles, à moins qu'on ne puisse se contenter de l'addition de la nouvelle traverse pour consolider le joint par le rapprochement des supports qui lui sont adjacents ; mais pour les voies dont les rails ont un poids de 37 à 38 kilogrammes, et sur lesquelles la circulation à grande vitesse n'est par très-fréquente, ou pourra le plus souvent attendre l'époque du premier renouvellement des traverses pour recourir à l'emploi d'un moyen de consolidation du joint ; avec cette dimension de rails, surtout s'ils ont des supports assez nombreux, la mobilité du joint est beaucoup moins désastreuse qu'avec des rails légers, et la question d'opportunité d'une dépense de consolidation peut rester douteuse.

Mais ce qu'il conviendrait surtout de faire en France, ce serait d'étudier la question de la pose sur longuerines, qui a toujours été laissée de côté. En Angleterre, où les bois résineux sont exclusivement employés pour l'application de ce système, et où il a fallu remédier à leur compressibilité par l'application de cales en bois dur sous les rails, où les machines n'ont pas été

amenées au degré de stabilité convenable, les longuerines paraissent d'un usage moins avantageux qu'en France, et cependant elles ont pour elles la sanction d'une longue expérience sur le Great-Western, l'opinion actuellement favorable de quelques ingénieurs, et enfin le succès du rail Barlow et des différents systèmes à entretoises fort éloignées les unes des autres, qui démontre qu'il n'est pas nécessaire d'attacher à la liaison transversale autant d'importance que l'a fait M. Brunel. Il semble, en y réfléchissant, qu'en plaçant en long, les unes à la suite des autres, en laissant entre leurs extrémités des intervalles de 30 à 40 centimètres pour faciliter l'écoulement des eaux superficielles, les pièces de bois de chêne que l'on pose actuellement comme traverses, en les reliant d'un côté à l'autre par des entretoises en fer ou en bois de sapin de faible équarrissage, en profitant des facilités ménagées pour l'écoulement des eaux afin de mieux enterrer les longuerines partielles dans le balast, on arriverait à construire une voie très-stable, à rails légers, peu coûteuse de premier établissement, d'un entretien facile et donnant un mouvement très-doux. Les ingénieurs paraissent n'avoir vu jusqu'ici dans la voie sur longuerines que le châssis rigide, avec entretoises pour chaque voie et entretoises d'une voie à l'autre, adopté par M. Brunel; il semble qu'en cherchant à combiner avec les propriétés de cette voie, celles des voies à supports isolés, dont le type est donné par les supports longitudinaux de M. Barlow, on devrait arriver en France à des résultats avantageux. C'est un point qui dans mon opinion mériterait d'être expérimenté d'une manière sérieuse.

J'ai cherché à établir comparativement le prix de revient de la voie ordinaire sur traverses et de la voie sur longuerines disposée comme je viens de l'indiquer,

j'ai trouvé les résultats suivants, pour une longueur de 5 mètres de simple voie, en supposant, ce qui est évidemment admissible, que les frais de pose, de consolidation des joints et de balast fussent les mêmes de part et d'autre :

1° *Voie ordinaire avec rails à double champignon de 37 kilogr. par mètre courant :*

	fr.	
10 mètres courants de rails, 370 kilog. à 0f,25.	92,50	
5 traverses, 0mc,5 à 60 fr.	30,00	
10 coussinets de 11kg,50 en moyenne, 115 kilog. à 0f,16.	18,40	
10 coins.	1,25	
20 chevilles, 7kg,50 à 0f.50.	3,75	
Total.	145,90	
		fr.
Ou par kilomètre de double voie.		58.360,00

2° *Voie sur longuerines discontinues avec rail américain de 33 kilog. par mètre courant :*

	fr.	
10 mètres courants de rails, 330 kilog. à 0f,25.	82,50	
4 longuerines de 0m,28 × 0m,15 × 0m,20, 0mc,37 à 60 fr.	22,20	
40 chevillettes de 0kg,250, 10 kilog. à 0f,50.	5,00	
2 entretoises en fer, 10 kilog. à 0f,40.	4,00	
Total.	113,70	
Ou par kilomètre de double voie.		45.480,00
Différence.		12.880,00

Si l'on voulait mettre en comparaison avec ce système la voie de W. Barlow, il faudrait compter pour le prix des rails environ 10 p. 100 en sus, ou 275 fr. la tonne, et on aurait, en reprenant les poids de MM. Liddell et Gordon, par kilomètre de double voie avec rails de 50 kilogrammes.

			fr.
Rails,	200 tonnes	à 275 fr. l'une.	55.000,00
Plaques de joint,	25	à 275	6.875,00
Entretoise,	10	à 275	2.750,00
Percement des trous et rivures.			Mémoire.
A reporter.			64.625,00

		fr.
Report.		64,626,00
	fr.	
Le prix de la voie sur longuerines est de	45.480,00	
Auquel il faut ajouter pour consolidation des joints avec éclisses légères environ	3.145,00	
Total.	48.625,00	48.625,00
Différence en faveur de la voie sur longuerines.		16.000,00

Les résultats qui précèdent, et qui ne peuvent pas s'éloigner beaucoup de la vérité, semblent démontrer tout l'avantage que présenterait ce nouveau système de voie au point de vue économique. Je n'ai pas tenu compte de l'économie de ballast que l'on pourrait certainement réaliser au même degré que pour la voie de W. Barlow, si l'on a égard à l'augmentation considérable de la surface utile, par laquelle les supports s'appuient sur le sol.

§ 3. *Rails et coussinets.*

La forme des rails employés actuellement en Angleterre se rapporte à deux types principaux : le rail à champignon, quelquefois simple, mais le plus souvent double et symétrique, et le rail en U renversé du Great-Western ou rail de Brunel ; ce dernier n'est employé que sur les longuerines ; le rail américain ou rail de Vignoles dont l'usage a pris un si grand développement en Allemagne, où on le pose sur traverses, n'a été employé que dans un petit nombre de cas, et cela sur longuerines. Si on laisse de côté le rail de M. W. Barlow, qui paraît devoir être adopté en Angleterre pour la plupart des nouvelles constructions, et les voies sur longuerines, la préférence paraît acquise au rail à double champignon symétrique, quoiqu'on trouve un assez grand nombre d'exemples dans lesquels le

champignon inférieur n'a que de petites dimensions, et sert uniquement à fixer le rail dans le coussinet. Lorsqu'on aura remédié aux inconvénients qui résultent de la mobilité du joint, et qu'on aura ainsi empêché la déformation du bout de rail à son point de contact sur la table du coussinet de joint, la préférence devra être acquise sans contestation, pour les voies du système actuel, au rail à champignons symétriques qui peut être retourné et qu'on n'est pas obligé de mettre au rebut dès qu'il se manifeste une dégradation résultant d'un vice de fabrication.

La forme du champignon varie beaucoup, mais depuis quelque temps on arrive à un bombement très-prononcé; on peut citer entre autres les rails du Great-Northern, du London and North Western, et du chemin de York-Newcastle and Berwick dont la surface de roulement a un rayon de cinq à six centimètres; en même temps qu'on diminue le rayon de la surface de roulement, on augmente le rayon des bords du champignon (voir la *fig.* 6, Pl. I). Je ne reviendrai pas ici sur les motifs qui doivent faire adopter un bombement très-prononcé pour les rails; je les ai développés longuement dans mon travail sur les chemins de fer d'Allemagne, et maintenant d'ailleurs personne ne conteste plus l'utilité de ce bombement. Il est à craindre cependant qu'on ne tombe bientôt dans un excès contraire, en diminuant outre mesure le rayon de la surface de roulement, comme paraissent y être disposés quelques ingénieurs anglais qui expriment leur opinion sur cette question, en disant que les rails ne sauraient être trop bombés.

Le bombement adopté sur les chemins indiqués plus haut, produit un excellent effet quant au mouvement des véhicules; le contact des roues avec les rails s'éta-

blit toujours au sommet du champignon qui ne porte qu'une trace brillante d'environ 2 centimètres de largeur ; on n'observe plus, comme avec les rails plats ou peu bombés, ces contacts alternatifs tantôt sur le bord intérieur, tantôt sur le bord extérieur ; les voitures ont plus de stabilité et l'entretien de la voie doit s'en ressentir. Le rayon de 5 à 6 centimètres paraît une limite convenable ; il ne paraît pas résulter de son adoption une accélération marquée dans l'usure des bandages, ce qui ne tarderait pas à avoir lieu si la surface de contact se trouvait de plus en plus réduite par la diminution de ce rayon.

Le poids des rails a été toujours en augmentant ; à l'origine des chemins à locomotives, le poids des rails était de $17^{kg},36$ par mètre ; on l'a porté bientôt après à $24^{kg},80$, puis, dans diverses périodes successives, à $30^{kg},75$ et $32^{kg},24$, à $35^{kg},71$ et $37^{kg},20$, et enfin à $39^{kg},68$ et même $42^{kg},16$; ces poids s'appliquent aux rails à champignons posés sur traverses. Maintenant on revient un peu en arrière, et la plupart des ingénieurs considèrent le poids de $39^{kg},18$ par mètre comme le plus convenable ; on descend même à $35^{kg},71$ par mètre lorsqu'on supplée à la résistance du métal par l'augmentation du nombre des traverses. L'espacement des supports (dés en pierres ou traverses), à l'origine, était généralement de $0^{m},915$; plus tard on l'a augmenté et quelquefois porté à $1^{m},524$ pour profiter de l'augmentation de poids donnée aux rails ; mais on n'a pas tardé à revenir au point de départ, et maintenant on emploie cinq et même six traverses pour un rail de $4^{m},572$ à $4^{m},877$ de longueur, six ou sept traverses pour un rail de $5^{m},486$, de telle sorte que l'écartement moyen varie de $0^{m},915$ à $0^{m},785$, et même $0^{m},753$.

Quant à la longueur des rails, les ingénieurs anglais

sont d'accord pour augmenter cette dimension autant que possible : on atteint maintenant les longueurs de $5^m,486$, $6^m,100$ et $6^m,705$, même pour le rail W. Barlow, de 50 kilogrammes par mètre courant. L'augmentation de longueur des rails diminue le nombre des joints, et par suite les frais de consolidation ou d'entretien; l'avantage qui en résulte ne peut pas être mis en balance avec la difficulté de la pose qui exige plus de bras.

Ce qui préoccupe surtout les ingénieurs depuis quelque temps, c'est la qualité des rails; c'est même une chose remarquable de voir à quel point cette question a été négligée en Angleterre, où l'on ne s'est attaché qu'à la question de prix, en laissant les maîtres de forge adopter cette règle de fabrication, que *tout est bon* pour faire des rails. Beaucoup de personnes sont disposées à vanter la simplicité de formes avec laquelle les affaires se traitent en Angleterre, la latitude donnée aux entrepreneurs et aux fabricants; on ne réfléchit pas assez que cette méthode, ou plutôt l'absence de toute méthode, a pour effet le plus certain la ruine des compagnies au profit des entrepreneurs. En France, on dit souvent que ce sont les entrepreneurs qui sont ruinés par l'État ou par les compagnies; on pourrait dire plus exactement que dans beaucoup de cas, ce sont les entrepreneurs qui se ruinent bénévolement par la concurrence qu'ils se font entre eux; mais il ne serait pas difficile, sans doute, d'arriver dans l'un ou l'autre pays à un moyen terme qui donnerait une satisfaction équitable à tous les intérêts.

La question de la qualité des rails a beaucoup préoccupé la compagnie du London and North-Western; elle a sous les yeux l'exemple de sa propre ligne (section du Grand-Junction), où des rails de $32^{kg},240$ par

mètre, bien fabriqués, n'avaient subi aucune altération après douze années de service, tandis que des rails de 39^{kg},680, placés dans les mêmes conditions, avaient été mis hors de service, quelques-uns après trois mois, la majeure partie après trois ou quatre années de pose. La compagnie avait exclu de ses marchés les maîtres de forge du pays de Galles, et fait toutes ses commandes dans Staffordshire, dont les fers passent pour être de meilleure qualité, à des prix supérieurs à ceux qu'on lui offrait dans le premier de ces deux districts métallurgiques ; mais l'exemple qui précède a démontré que cette précaution était insuffisante. La commission chargée, au commencement de 1849, par la compagnie, d'étudier les questions relatives à l'entretien et au renouvellement de la voie, n'avait pas trouvé d'autre remède au mal que d'exiger des fournisseurs de rails une garantie de deux années ; elle a émis en outre l'avis qu'il fallait remettre en vigueur l'essai de la résistance des rails avant la livraison, pratique depuis longtemps tombée en désuétude. Depuis cette époque, et en exécution de l'avis formulé par cette commission, la compagnie du London and North-Western a adopté le cahier des charges suivant pour les fournitures de rails et de coussinets :

SPÉCIFICATION POUR LES RAILS ET COUSSINETS.

Rails. « Les rails auront la section indiquée par le » gabarit, la longueur sera de 4^{m},572 ou de 5^{m},486; ils » seront parfaitement sains et droits, et d'une section » uniforme dans toute leur longueur ; les extrémités » seront coupées d'équerre. Chaque rail portera sur le » côté la marque du fournisseur, le mois et l'année de » la fabrication.

» Le fournisseur établira tel appareil que l'ingénieur

» de la compagnie pourra requérir pour soumettre les
» rails à telle épreuve qu'il jugera convenable; l'ingé-
» nieur aura la faculté de rejeter les rails qui lui sem-
» bleront défectueux ou d'une fabrication inférieure.

Coussinets. » Les coussinets seront en fonte grise cou-
» lée au cubilot, de la forme convenable pour recevoir
» le rail; les pièces fondues seront nettes, de dimen-
» sion et de qualité uniformes; ils seront fondus sur le
» modèle de MM. Ransome et May, qui livreront, aux
» frais du fabricant, les gabarits du profil intérieur et
» extérieur. Le fournisseur remettra à la compagnie des
» coussinets, agréés par l'ingénieur, qui serviront de
» types pour la réception des livraisons. Le fournisseur
» garantira les coussinets jusqu'au moment de la mise
» en service, et remplacera tous ceux qui auraient été
» brisés dans la pose. Les coussinets porteront le nom
» du fournisseur et les initiales L. et N. W. R.

» La livraison aura lieu comme suit:

» Au port de la compagnie, à l'intersection du canal
» de Paddington et du West-London-Railway; aux sta-
» tions de Birmingham ou de Liverpool; dans les ma-
» gasins de la compagnie aux stations de Waterloo ou
» de Wapping, à Liverpool.

» Les rails et les coussinets seront mis en tas sur le
» port, aux endroits désignés par l'ingénieur, ou livrés
» chargés sur les waggons de la compagnie, au choix
» de celle-ci.

» Les soumissions devront indiquer le poids des rails
» et des coussinets que les fournisseurs s'engageront
» à livrer, le lieu et l'époque de la livraison, et le prix
» de la tonne.

» Les soumissionnaires indiqueront aussi le prix par
» tonne auquel ils s'engageront à reprendre, en quan-
» tité au plus égale, les rails et coussinets hors de ser-

» vice, dont la compagnie leur fera la remise aux en-
» droits ci-dessus indiqués.

» Les rails neufs pèseront environ 42^{kg},160 par mètre,
» les coussinets de joint, 18^{kg},136, et les coussinets in-
» termédiaires, 12^{kg},242. »

Les dernières commandes faites sur ce cahier de charges, au mois de juillet 1851, avaient été soumissionnées au prix de 146^{f},85 par tonne pour les rails neufs, et au prix de 68^{f},75 pour les coussinets. On peut adopter comme moyenne des prix actuels des rails ordinaires et des coussinets, les chiffres de 150 francs et 80 à 100 francs la tonne. Le remplacement des vieux rails par des rails neufs, poids pour poids, avait été soumissionné à la même époque, les matériaux pris et rendus à l'usine à 57^{f},50, celui des coussinets à 43^{f},75.

La question de la qualité des rails a toujours été beaucoup mieux traitée en France qu'en Angleterre; cependant il ne semble pas qu'on y ait toujours apporté une attention suffisante. Le moment est favorable pour faire passer dans les usages de la fabrication et de la réception un contrôle sévère, et pour amener les maîtres de forge à soigner la qualité de leurs produits, plus qu'ils ne l'ont fait dans ces dernières années, lorsque les usines pouvaient à peine suffire aux demandes des compagnies.

Les ingénieurs anglais n'imposent aucune condition pour la composition des paquets et pour le degré d'affinage du fer employé; il y a tout lieu de croire que sur les chemins où la circulation est très-active, où l'on emploie de lourdes machines, et où la vitesse est considérable, il y aurait avantage à employer des rails entièrement fabriqués en fer n° 2, c'est-à-dire ayant subi un premier corroyage avant d'entrer dans la composition des paquets, au lieu de composer ces paquets,

comme on est censé le faire habituellement, de deux tiers de fer n° 1 et un tiers de fer n° 2; les rails, mieux soudés, par cela même que le fer serait homogène et de meilleure qualité, auraient une durée qui compenserait sans doute l'augmentation de prix. Ce mode de fabrication devrait être adopté, surtout à une époque où le prix du fer est exceptionnellement bas; il est douteux cependant que pour des portions de lignes ou pour des embranchements à très-faible trafic, il y ait lieu d'y recourir, car la durée des rails ordinaires, dans de telles circonstances, peut être très-considérable, surtout si la fabrication en elle-même a été bien soignée.

Quelques ingénieurs français se sont beaucoup préoccupés de cette question, et ont pensé qu'on pourrait obtenir une compensation à l'augmentation du prix d'achat dans la réduction du poids; en procédant ainsi, on pourrait éprouver de graves mécomptes, car ce qui manque aux anciens rails d'un faible poids, c'est surtout la rigidité; c'est un excès de flexibilité qui devient la cause principale du dérangement des voies et la source des dépenses d'entretien de toute nature que l'on s'applique maintenant à éviter. C'est seulement dans le cas où les rails seraient placés sur des supports continus ou très-rapprochés, dans le cas par exemple où l'on poserait des rails sur longuerines en chêne, comme je l'ai indiqué précédemment, que l'on pourrait, avec quelque certitude de succès, diminuer le poids des rails en améliorant leur qualité. Il y aurait, du reste, à examiner si l'emploi d'une forte proportion de fer n° 1 dans la composition des paquets, n'ajoute pas à la rigidité des rails.

Lorsqu'on discute la question de l'usure des rails, on ne fait pas en général une attention suffisante à l'influence exercée par l'état d'entretien des véhicules. —

Il est évident que pour peu que la courbure de la surface de roulement soit peu prononcée, les roues des machines et des wagons qui se creusent en gorge, viendront promptement porter sur les bords des rails, et produire des effets d'exfoliation, de laminage, etc., qui conduisent à un prompt renouvellement. Les rails fortement bombés et à bords très-arrondis, que l'on emploie maintenant en Angleterre, paraissent devoir être soustraits, par leur forme même, à cette cause de dégradation; mais sur la plupart des chemins anglais, sur les chemins de fer français et surtout sur les premières lignes, construites avec des rails plats ou peu bombés, on atténuerait sensiblement la destruction des rails, en remettant fréquemment les roues des machines sur le tour, et en évitant de laisser creuser sur les roues des wagons une gorge trop profonde; — si l'on pouvait établir une comparaison exacte des frais qui seraient nécessaires pour maintenir le profil normal des bandages, en retournant les roues de machines toutes les fois que la gorge produite par l'usure atteindrait une profondeur de 2 à 3 millimètres pour les roues de machines, et de 4 à 5 millimètres pour les roues de wagons, avec l'économie qui en résulterait pour la conservation des rails, pour l'entretien journalier de la voie, pour l'entretien du matériel et spécialement des bandages eux-mêmes, pour la dépense de traction, sans même avoir égard à la commodité des voyageurs, il est certain qu'on serait amené à maintenir les bandages dans un état parfait d'entretien, et dans ce but on serait conduit, plus qu'on ne l'a fait jusqu'ici, à employer l'acier pour leur fabrication. C'est là une des objections sérieuses que l'on peut faire aux traités de traction, car un entrepreneur qui, à tort ou à raison, à son point de vue, néglige l'entretien des

bandages de roues, aggrave les charges de certaines parties du service de la compagnie, sans compter l'incommodité qui résulte pour les voyageurs de l'instabilité des voitures.

La durée des rails dépend de plusieurs éléments très-importants et extrêmement variables, de telle sorte qu'il est impossible de poser des chiffres même approximatifs pour l'apprécier ; elle dépend du poids des rails, du mode de fabrication, de la qualité du métal, de l'importance et de la nature du trafic, du mode de construction et d'entretien de la voie, du poids des machines, etc.; aussi les chiffres indiqués par les ingénieurs anglais varient-ils entre des limites extrêmement écartées, de quatre à vingt ans, par exemple. Dans l'état actuel des chemins de fer anglais, si l'on tient absolument à fixer les idées par un chiffre, on peut estimer que la durée moyenne des rails de l'ensemble des chemins à grand, moyen et petit trafic sera de quinze à vingt années. En France, où la qualité des rails paraît en général meilleure, et où l'importance moyenne du trafic est moins considérable, on peut compter sur une durée plus considérable, spécialement pour les chemins récemment construits dont les rails ont un poids supérieur à 35 kilog. par mètre courant; mais il serait bien difficile, avec une expérience aussi peu prolongée, et lorsque les communications par chemins de fer sont loin d'avoir reçu tout leur développement, de hasarder un chiffre quelconque; dans chacun des cas particuliers où la fixation d'un chiffre sera nécessaire, l'observation des faits constatés sur les chemins placés dans des conditions analogues fournira des renseignements plus utiles qu'une évaluation moyenne, qui serait aujourd'hui tout à fait arbitraire. En se livrant à des recherches de cette nature, il y a un point qu'on

ne devra pas perdre de vue, c'est l'influence que doivent nécessairement exercer la pression et la flexion, sans cesse répétées que les rails éprouvent, sur l'adhérence de la couverte en fer corroyé n° 2 avec le fer n° 1 qui forme le corps du rail; la soudure nécessairement imparfaite entre ces deux espèces de fer doit éprouver une altération progressive, dont l'effet peut ne se manifester qu'au bout d'un certain temps, de telle sorte que le nombre des rails à remplacer chaque année augmente, à partir d'un certain moment, suivant une progression très-rapide. On risquerait fort de se tromper si l'on cherchait à établir une loi basée sur l'observation du nombre de rails mis hors de service pendant les premières années d'exploitation, ou sur l'usure résultant du frottement et de l'oxidation; il serait également nécessaire de faire une large part à l'augmentation de vitesse et de trafic que l'avenir réserve aux chemins de fer du continent, plus encore qu'aux chemins de fer de l'Angleterre. A ce point de vue la durée presque séculaire que quelques ingénieurs ont été conduits à donner aux rails, notamment en Belgique, est d'une exagération manifeste.

Les coussinets qui relient les rails aux traverses sont en général en fonte de bonne qualité et ne donnent pas lieu à un entretien très-dispendieux; dans ces dernières années on s'est appliqué à augmenter leur poids, surtout aux joints; on a vu plus haut que le dernier modèle adopté sur le London and North-Western pesait plus de 28 kilogrammes pour le joint et de 22 kilogrammes pour les traverses intermédiaires; l'amélioration du joint par l'un quelconque des moyens indiqués plus haut, et l'application des moyens connus pour donner de la stabilité aux machines, permettraient de revenir aux dimensions restreintes qui sont encore en usage

en France. Mais les coussinets sont un mauvais intermédiaire pour fixer les rails sur les supports; le point d'application des efforts perturbateurs qui sollicitent les rails dans le sens horizontal et dans le sens vertical se trouve placé à une trop grande distance des points d'application des résistances, c'est-à-dire du point où les chevillettes s'enfoncent dans les traverses pour y fixer les coussinets, et du point où les traverses elles-mêmes reposent sur le sol; le rail a moins de stabilité que s'il était posé directement sur le bois, d'autant moins qu'il faut lui donner un surcroît de hauteur pour le fixer dans ses supports, et surtout pour lui donner une résistance et une rigidité en rapport avec l'étendue des portées. Les coussinets entrent en outre pour une part importante dans les frais de construction. La suppression des coussinets est à ce double titre un des avantages les plus importants de la voie sur longuerines et de la voie de M. W. Barlow, et c'est l'économie qu'on réalise sur cet article qui peut les rendre l'un et l'autre plus économiques que la voie sur traverses. Les ingénieurs allemands se sont beaucoup préoccupés de cette question et ont adopté presque généralement le rail américain, à simple champignon et à large base plate, qu'ils posent directement sur des traverses assez rapprochées. Il y a lieu de s'étonner qu'en adoptant ce rail ils n'aient pas été conduits à la pose sur longuerines, qui convient autant à cette forme que la pose sur traverses lui convient peu; on doit supposer qu'ils ont été arrêtés par les inconvénients inhérents au système de la voie du Great-Western, système bien connu en Allemagne par l'application qui en a été faite sur le chemin de fer du grand-duché de Bade; ils ont sans doute considéré la rigidité du châssis en bois et la solidarité des deux voies de M. Brunel, comme une condi-

tion indispensable de succès, et ont en même temps reculé devant les difficultés d'exécution et d'entretien qui en sont la conséquence.

Si l'on venait à adopter en France le système de voie dont j'ai indiqué précédemment le principe, et qui consiste à poser des rails à base plate sur des supports longitudinaux discontinus, c'est au rail américain qu'il faudrait recourir; il présente une large surface à sa base, et le champignon est susceptible de recevoir les formes les plus appropriées au profil des bandages de roues. Le rail de Brunel ne peut pas présenter de renflement au sommet, et, indépendamment des difficultés de fabrication, il se prête moins bien que le rail américain à l'adoption d'un profil convenable pour la surface de roulement, ou plus exactement pour la surface latérale de contact du boudin avec le rail dont on s'applique maintenant de plus en plus à augmenter le rayon. Les rails américains peuvent être consolidés aux joints par des éclisses boulonnées, comme les rails à double champignon, tandis que le joint du rail Brunel ne peut être consolidé que par une plaque rivée sur la base de chaque bout de rail, et par conséquent d'une manière moins solide qu'avec le système Samuel. On ne doit pas perdre de vue que les ingénieurs allemands ont déjà une grande expérience des chemins de fer, qu'ils étudient avec soin toutes les questions, et par suite l'adoption qu'ils ont faite du rail américain doit être d'un grand poids en faveur de ce système. En Angleterre, au contraire, les questions se tranchent au jugé, et souvent sans que l'on apprécie autre chose que le résultat brut, et il est possible que le peu de succès du rail américain ait uniquement tenu à la mauvaise qualité du fer employé pour la fabrication des premiers rails, si toutefois le germe du système ne s'est pas

trouvé étouffé dans la lutte engagée entre le système du Great-Western et ses adversaires. Quoi qu'il en soit, la question ne peut pas être considérée comme tranchée contre le rail américain, et il y a tout lieu de croire qu'en combinant ce rail avec un système de voies à supports longitudinaux en bois, entretoisés par des barres de fer, comme le sont les supports en fonte des diverses patentes anglaises, on arriverait en France à réaliser d'une manière satisfaisante la plupart des améliorations que réclame le mode actuel de construction des voies.

Les rails sont toujours fixés dans les coussinets par des coins en bois, le plus souvent comprimés. Les coussinets sont attachés sur les traverses au moyen de chevilles en fer et très-souvent de chevilles en bois comprimé; la cheville en bois paraît du reste, si l'on examine de près le rôle qu'elle joue, devoir mieux convenir que la chevillette en fer pour les traverses en sapin; sur celles-ci les chevilles en bois font en quelque sorte corps avec le bois et sont très-solidement enracinées, tandis que les chevillettes en fer prennent du jeu au bout de très-peu de temps; l'humidité intervient, et la chevillette en ouvrant un passage à l'eau devient une cause accélératrice de destruction.

§ 4. *Accessoires de la voie.*

Les changements et croisements de voie présentent peu de particularités dignes d'être mentionnées; les contre-rails des aiguilles de changement de voie disparaissent partout, et les pointes des aiguilles sont chanfrinées et vont se loger sous le champignon, qu'on cesse également d'entailler. On remarque sur le South-Eastern des supports en fonte de M. P. Barlow qui portent et

rendent solidaires toutes les pièces d'un même croisement ou changement de voie; cette disposition est l'annexe obligé de son système de supports, dans lequel il s'est proposé d'exclure le bois d'une manière complète et d'améliorer les joints en encastrant les rails et en réduisant le nombre des pièces. Sur plusieurs points, où l'on a accumulé un grand nombre de voies pour la composition des trains de marchandises, on observe avec intérêt un moyen simple de jonction entre toutes ces voies; une voie d'intersection coupe sous un angle un peu aigu toutes les voies de garage, et est réunie avec chacune d'elles par un système de quatre aiguilles, formant deux changements de voie opposés l'un à l'autre. Le rayon de courbure de ces changements de voie est très-court; mais pourvu que les machines et surtout les waggons puissent y passer, on ne s'en inquiète pas davantage.

Les plaques tournantes sont généralement en fonte, quelquefois recouvertes en bois dans les gares couvertes; on a fait quelques essais de construction en tôle, mais ce système n'est pas encore très-répandu. Partout on trouve des plaques tournantes de grand diamètre pour tourner à la fois les machines et les tenders; leur construction est en général très-simple et se réduit souvent à un pont à une seule voie, mobile sur un pivot et soutenu à ses extrémités par des galets d'un grand rayon. Comme nouveauté, on remarque dans une station un contre-poids roulant, que l'on déplace sur la plaque pour chaque machine, de manière à ramener le centre de gravité sur le pivot, ce qui est avantageux pour la mobilité de la plaque.

M. Armstrong, constructeur de machines à Newcastle, a eu l'heureuse idée d'employer l'eau sous une forte pression pour manœuvrer les plaques tournantes de ma-

chines et tenders réunis; un cylindre, couché horizontalement au-dessous du rail circulaire qui reçoit les galets de support placés à la circonférence de la plaque tournante, renferme un piston à double effet; ce piston reçoit à volonté, sur l'une ou l'autre de ses faces, la pression de l'eau prise dans un réservoir très-élevé; il porte une tige qui se prolonge par une crémaillère engrenant avec une roue dentée, fixée sur le pivot de la plaque. Un levier, qui s'élève au-dessus du sol et que le premier venu peut manier, commande les tiroirs, et il suffit de le manœuvrer pour faire tourner la table dans un sens ou dans l'autre: le mouvement se produit sans choc et avec une aisance très-remarquable; j'ai constaté qu'il suffisait d'une minute et demie pour tourner une machine et son tender.

M. Armstrong a appliqué le même principe pour manœuvrer les grues de la gare des marchandises de Newcastle; la grue est montée sur une colonne fixe et creuse autour de laquelle elle tourne. La chaîne à laquelle on suspend les fardeaux vient embrasser une poulie fixée au sol de la galerie inférieure dans laquelle est placé le moteur; elle s'enroule ensuite sur une poulie mobile et vient s'attacher à un point fixe; cette dernière poulie est attachée par sa chape à la tige d'un piston à simple effet, garni d'un cuir embouti et mobile dans un cylindre fermé. Enfin la chaîne, à son extrémité supérieure, porte un contre-poids qui concourt avec le poids du piston à faire redescendre le crochet lorsque l'on veut y appliquer le fardeau à soulever. Au moyen de deux tiroirs à introduction graduelle, on applique la pression hydraulique sous le piston pour enlever le fardeau, ou bien on fait écouler l'eau pour le faire redescendre. Les leviers qui commandent les tiroirs sortent au-dessus de la plate-forme du quai de

déchargement et peuvent se manœuvrer avec une extrême facilité. La gare de Newcastle comprend vingt-deux grues semblables pouvant lever chacune une tonne un quart; elles coûtent 2.000 francs avec tous leurs accessoires, mais non compris les fondations. Cette installation est assez coûteuse, parce qu'il a fallu établir sous les quais de la gare des galeries voûtées et des aqueducs de décharge; la consommation d'eau est elle-même une source de dépenses, mais l'économie de la main-d'œuvre est telle que tous ces frais sont largement compensés. On a profité pour faire cette installation de ce que l'eau distribuée dans la ville y est amenée, des réservoirs placés sur les hauteurs voisines, sous une charge considérable. La compagnie du Great-Northern, qui a établi à Londres des magasins à blé à plusieurs étages et qui les a surmontés d'un vaste réservoir destiné à fournir l'eau dans tous ses établissements et à procurer un moyen de secours très-efficace en cas d'incendie, se propose d'appliquer le système de M. Armstrong dans la gare de marchandises adjacente à ces magasins, sous laquelle règnent d'ailleurs de vastes galeries voûtées; elle se propose également d'y appliquer les monte-sacs hydrauliques dont le modèle a figuré à l'exposition; la course, très-longue pour un monte-sacs, est obtenue en faisant agir la tige du cylindre sur un système de moufles. Pour les appareils très-puissants, M. Armstrong emploie son moteur hydraulique à double effet pour faire tourner la grue sur son pivot, exactement comme pour la grande plaque tournante de Newcastle.

Ce système peut trouver une application utile dans les gares de marchandises adjacentes aux ateliers de réparation et aux grands dépôts de machines, où il y a toujours intérêt à établir des réservoirs à une grande hau-

teur pour le lavage des machines et comme moyen de secours en cas d'incendie; la dépense d'eau, dans de telles circonstances, serait insignifiante, car avec un réservoir de 25 mètres de hauteur, elle serait d'environ 2 hectolitres pour chaque colis, d'un poids quelconque jusqu'à 1.000 kilog., élevé à 2 mètres de hauteur; si chaque grue à moteur hydraulique devait économiser seulement le salaire d'un homme d'équipe, les dépenses d'installation de toute nature et d'entretien seraient largement couvertes. Dans ce système, on a l'avantage de ne dépenser de la force motrice que pour une grue, lorsqu'un seul de ces appareils est en mouvement, tandis que si l'on prenait comme moteur une machine à vapeur nécessairement puissante, elle devrait rester constamment en mouvement avec tout l'attirail de transmission, même lorsqu'une seule grue serait en fonction et souvent même dans les intervalles, lorsque aucun appareil ne serait en mouvement. A Liverpool, dans la nouvelle gare de marchandises, les grues sont pourvues d'un mécanisme analogue à celui du monte-sacs et qui rend le chargement des balles de coton très-expéditif; ces appareils sont commandés par une forte machine à vapeur qui met en même temps en mouvement les monte-sacs d'un magasin à plusieurs étages annexé à la gare.

Les gares de marchandises anglaises sont garnies d'un nombre considérable de grues, qui facilitent le travail et réduisent en général les frais de main-d'œuvre; mais lorsqu'elles sont manœuvrées à bras d'hommes, il est douteux que leur emploi soit économique pour des colis d'un poids moyen, qui peuvent être roulés, ou transportés sur des diables, et que deux ou trois hommes peuvent élever en les faisant glisser sur des poulains. Le nombre de ces appareils paraît souvent hors de pro-

portion avec les nécessités du service, et de plus il ne serait pas difficile de constater beaucoup de cas dans lesquels l'usage mal entendu des grues est une cause de perte de temps.

Les grues hydrauliques destinées à fournir l'eau aux machines de passage dans les stations principales, ont des formes très-variées, mais en général elles sont disposées de manière à permettre l'écoulement rapide de l'eau; de plus on a soin de mettre la manivelle qui commande la valve de distribution, sur le col même de la grue et à portée de l'homme placé sur le tender pour diriger l'eau dans le trou d'introduction. Il est inutile d'avoir un autre homme posté au pied de la grue pour fermer l'introduction, au moment où le remplissage du tender est terminé. C'est une simplification très-utile d'un détail de service qui ne manque pas d'avoir son importance. On a imaginé sur un chemin de fer de combiner le mouvement de rotation du col de la grue avec un mouvement ascensionnel sur un plan incliné, de telle sorte que dès qu'il est abandonné à lui-même il s'efface et revient dans la position parallèle à la voie.

§ 5. *Renouvellement de la voie.*

La question du renouvellement de la voie a beaucoup occupé depuis plusieurs années les personnes engagées en Angleterre dans l'industrie des chemins de fer; la destruction rapide des rails, sous l'influence de la maumauvaise fabrication, du poids croissant des machines et de la vitesse, est venue augmenter dans une proportion notable les frais d'exploitation, en même temps que l'énormité des dépenses dans lesquelles les compagnies s'étaient jetées pour éteindre les concurrences, soit en achetant, soit en créant des lignes improduc-

tives, écrasait le revenu des actionnaires. On s'est demandé si les frais de remplacement des traverses, des rails et des autres éléments destructibles de la voie devaient être prélevés sur les revenus annuels, comme les frais réguliers et permanents d'exploitation, ou s'il fallait constituer un fonds de réserve, grevant d'une manière uniforme chaque exercice, et destiné à pourvoir à l'achat de nouveaux matériaux au fur et à mesure des besoins. Les conseils d'administration, et surtout les compagnies un peu prospères, se sont montrés en général favorables à cette mesure, qui met leur responsabilité à l'abri et qui les préserve des orages que susciterait inévitablement, dans une assemblée générale l'annonce d'une réduction de dividende produite par la nécessité de remplacer tout à coup une partie considérable des voies mises hors de service; les actionnaires au contraire, cruellement éprouvés par la marche imprimée dans ces dernières années à la direction de leurs affaires, et par la réduction successive de leurs dividendes, paraissent en général hostiles à cette mesure.

La compagnie du London and North-Werstern est une de celles qui ont le plus complétement étudié la question; au commencement de l'année 1849, elle a chargé ses ingénieurs et ses chefs d'exploitation de lui faire un rapport à ce sujet, et c'est ce rapport, livré à la publicité, qui sert généralement de base aux discussions que la question du renouvellement soulève. Cette commission, après avoir admis que la durée moyenne des traverses non créosotées serait de douze années, et celle des traverses créosotées de vingt années, que la durée des rails et des coussinets, pour la ligne principale et les embranchements, serait en moyenne de vingt années, a recherché quelle serait

la dépense de renouvellement d'un mille de double voie :

1° Sur la ligne principale (la section du Grand-Junction exceptée) ;

2° Sur les embranchements ;

3° Sur le Grand-Junction, dont l'entretien est confié à un entrepreneur qui doit fournir la main-d'œuvre et les matériaux autres que rails et coussinets pour le renouvellement. Les prix de revient (ramenés au kilomètre de double voie) ont été établis de la manière suivante, en supposant aux traverses une duré de vingt années :

1° Ligne principale (Grand-Junction excepté).

			fr.
160^{t},6	de rails livrés à la gare de Birmingham, à 162^{f},50 la tonne		26,097,50
56^{t},2	de coussinets livrés à la gare de Birmingham à 115^{f},60 la tonne		6.531,40
216^{t},8	à transporter sur le chemin de fer à 6^{f},25		1.355,00
365	traverses de joint à 12^{f},50	4.562^{f},50	15.943,75
1.821	traverses intermédiaires à 6^{f},25	11.381^{f},25	
1.000	mètres courants de pose, y compris la fourniture des chevillettes et des coins, à 6^{f},84 l'un		6.840,00
	Total		56.767,65
	A déduire :	fr.	
	Vieux rails, 160^{t},6 à 112^{f},50 l'une	18.067,50	
	Coussinets, 56^{t},2 à 62^{f},50 l'une	3.512,50	
		21.580.00	
	Transport de 218^{t},8 à 6^{f}.25 à retrancher.	1.355,00	
	Reste	20.225,00	20.225,00
	Prix de renouvellement		36.542.65

2° Embranchements.

141	tonnes de rails, livrées a Birmingham, à 162^{f}50 la tonne	22.912,50
37^{t},3	de coussinets, livrés à Birmingham, à 115^{f},60 la tonne	4.311,85
178^{t},3	à transporter surle chemin de fer, à 6^{f},25 l'une	1.114,31
	A reporter	28.338,70

Report		28.338,70
2.186 traverses à 6f,25 l'une.		13.662,55
1.000 mètres de pose (chevilles et coins compris) à 6f,84 l'un.		6.840,00
Total.		48.841,20
A déduire :	fr.	
Vieux rails, 141 tonnes à 112f,50.	15.862,50	
Vieux coussinets, 37t,3 à 62f,50.	2.331,25	
	18.193.75	
Transport de 178t,3 à 6f,25 à retrancher.	1.114,35	
	17.079,40	17.079,40
Prix du renouvellement.		31.761,80

3° *Grand-Junction*

165t,8 de rails, livrés à Wolwerhampton, à 162f,50 la tonne.		fr. 26.942,50
56t.2 de coussinets, livrés à Wolwerhampton, à 115f,60 la tonne.		6.531,40
222t,0 à transporter à 48km,3 en moyenne à 5f,12 l'une.		692,65
Total.		34.166,55
A déduire :	fr.	
Vieux rails, 165t,8 à 112f,50 l'une. . . .	18.652,50	
Vieux coussinets, 56t,2 à 62f,50 l'une.. .	3.512,50	
	22.175,00	
Transport de 222 t. à 3f,12 à retrancher.	692,65	
	21.482,35	21.482,35
Dépense de renouvellement.		12.684,20

C'est donc une dépense nette à faire, pour chaque période de vingt années, par kilomètre de double voie :

	fr.
1° Pour la ligne principale, de.	36.542,65
2° Pour les embranchements, de. . .	31.761,80
3° Pour le Grand-Junction, de.	12.684,20

ou si l'on ne veut admettre pour les traverses qu'une durée de douze années :

	fr.
Pour la ligne principale.	47.145,70
Et pour les embranchements.	42.407,80

Après avoir établi ce point de départ, la commission a recherché quelle serait l'annuité à 4 1/2 p. 100, payée deux tiers au 1[er] janvier de chaque année, et un tiers au 1[er] juillet, qui reproduirait au bout de vingt années la somme totale égale aux frais de renouvellement de chaque partie de la ligne; elle a trouvé les résultats suivants :

DÉSIGNATION DES PARTIES.	LONGUEUR.	ANNUITÉ PAR KILOMÈTRE de double voie.	
		Traverses durant 12 années.	Traverses durant 20 années.
	kilom.	fr.	fr.
Ligne principale (Grand-Junction excepté)	231,0	1.439,60	1.114,70
Embranchements	319,2	1.294,90	970,00
Grand-Junction et embranchements entretenus à l'entreprise.	140,9	887,05	387,05
Moyenne	»	919,20	748,45
Total général	691,1	635.259,10	517.253,80

Ces calculs correspondent à un trafic moyen de cinquante trains par jour sur la ligne principale, et de dix-huit trains sur les embranchements.

La commission a proposé à la compagnie de porter à 517.500 francs par an le prélèvement annuel destiné à constituer le fonds de réserve, qui n'était alors que de 400.000 francs, en le bonifiant d'un intérêt de 4 1/2 p. 100 par an; en même temps elle engageait la compagnie à pourvoir par un emprunt à la portion du fonds de réserve correspondant aux années déjà écoulées depuis l'origine moyenne de la ligne, et qu'il était nécessaire de rapporter pour compléter ce système. Dans un précédent rapport elle avait établi qu'il n'y avait pas lieu à faire un fonds spécial de renouvellement pour le matériel roulant.

Pour rendre ces déductions applicables à d'autres lignes, il faut en dégager la situation particulière du Grand-Junction et d'une partie des embranchements pour lesquels une partie du renouvellement est à la charge d'un entrepreneur, que l'on paye en conséquence; en définitive, la commission estime que pour pourvoir au renouvellement d'une ligne placée dans les conditions du London and North-Werstern, il faudrait prélever, sur le revenu, une annuité de 1.100 francs à 1.400 francs pour la ligne principale, de 950 à 1.300 francs pour les embranchements, par kilomètre de double voie, suivant qu'on évalue à vingt années, ou seulement à douze années, la durée des traverses.

La compagnie a adopté la proposition de ses chefs de service; mais elle a réduit à 4 p. 100 l'intérêt du fonds de renouvellement, en portant l'annuité à 551.250 fr., un tiers imputable sur le premier semestre, et deux tiers sur le deuxième semestre; depuis cette époque elle a continué à s'assujettir à cette mesure.

La compagnie du South-Eastern porte au fonds de réserve une annuité produisant intérêt à 5 p. 100 de 714f,55 par kilomètre exploité; d'autres compagnies portent à la réserve, pour le renouvellement de la voie, une somme fixe déterminée par des procédés analogues à ceux qui ont été indiqués et dont les intérêts s'accumulent; d'autres enfin se contentent de porter à un fonds de réserve général, ou quelquefois spécial pour chaque partie du matériel destructible (voie de fer, machines locomotives, waggons, etc.) une somme fixée annuellement par les assemblées générales. Il y a enfin quelques compagnies, notamment le Great-Western, qui, systématiquement, ne font aucune réserve pour le renouvellement de la voie.

Il est incontestable qu'une compagnie doit toujours avoir une réserve pour faire face aux circonstances imprévues ; mais le principe d'un fonds de renouvellement destiné à pourvoir au remplacement des matériaux de la voie, au fur et à mesure de leur destruction, est sujet à contestation. Il est à peu près impossible de calculer le montant de l'annuité nécessaire pour assurer sa formation intégrale ; si cette annuité était établie sur une base suffisamment large, les compagnies verraient s'accumuler entre leurs mains des capitaux considérables dont la conservation et la mise en valeur deviendraient un embarras, et qui seraient soumis à toutes les chances de perte auxquelles des placements d'argent sont exposés dans une période de temps un peu longue, ce qui ne les dispenserait pas d'ailleurs de faire une réserve générale pour les accidents, cas imprévus, etc., puisque la réserve de la voie aurait une destination forcée. Il serait même peut-être difficile de résister à la tentation d'appliquer ces capitaux à des agrandissements, à des modifications devant lesquels on reculerait s'il fallait les demander au capital de premier établissement ou au revenu des actionnaires. La constitution d'un fonds de renouvellement ne serait justifiée que si le remplacement des matériaux devait avoir lieu instantanément, dans l'intervalle d'un très-petit nombre d'années ; or ce n'est pas cela qui a lieu : les différentes parties d'une ligne un peu étendue ont été construites à des époques différentes, avec des matériaux de force et de qualité ou même de nature variable ; elles sont soumises à des causes très-diverses d'usure, soit parce que le trafic n'est pas le même, soit parce que la nature du sol, du tracé ou du profil, est plus ou moins favorable à la conservation des matériaux. Des traverses qui doivent durer en moyenne quinze années,

ne seront remplacées intégralement qu'au bout de vingt ou vingt-cinq années, et une partie importante en aura peut-être été renouvelée dans le cours des dix premières années ; des rails auxquels on assigne une existence moyenne de vingt-cinq années commenceront à être mis hors de service au bout de quatre ou cinq ans dans les stations et à leurs abords, au bout de dix à quinze ans sur les parties très-fréquentées, et les derniers ne seront peut-être remplacés qu'après une durée totale de quarante à cinquante années. Dans cet état de choses, il est impossible, en supposant même que la durée moyenne des matériaux à renouveler soit exactement connue, de faire un calcul sérieux pour la fixation d'une annuité ; de plus, on peut admettre que les frais de renouvellement, après avoir subi un accroissement progressif, deviendront sensiblement uniformes après une période de temps assez longue, de quinze à vingt années par exemple, et à cette époque l'annuité de renouvellement ne sera plus autre chose que la dépense annuelle du remplacement.

Si le revenu brut des chemins de fer était limité à un taux déterminé qui ne pût jamais être dépassé, comme l'intérêt de la rente ou d'un placement hypothécaire, on comprend qu'il serait d'une bonne administration de répartir uniformément les dépenses sur toute la durée des concessions ; mais il n'en est pas ainsi : le produit des chemins de fer subit un accroissement rapide, et à l'époque où le renouvellement des traverses et des rails viendra augmenter les dépenses annuelles, le revenu aura éprouvé lui-même une augmentation considérable. Tout ce que l'on peut faire, c'est de créer, comme les statuts des compagnies françaises leur en imposent l'obligation, un fonds de réserve général, qui servira, le cas échéant, à alléger les dépenses qui pour-

raient s'accumuler trop fortement sur quelques années consécutives, dans la période du premier renouvellement, si l'usure des matières périssables n'avait pas atteint l'uniformité qu'on doit prévoir au bout d'un certain temps. La retenue de 5 p. 100 sur le produit net, prescrite par les statuts de nos compagnies, remplirait suffisamment ce but, si elle n'était pas limitée souvent à un chiffre assez bas, par exemple à 1 ou 2 p. 100 du capital social; il sera prudent pour les compagnies, lorsqu'elles verront arriver le moment où la majeure partie, soit des traverses, soit des rails, devront être remplacés, d'augmenter momentanément l'importance de la réserve, afin d'être en état de pourvoir, dans une certaine mesure, aux éventualités de ce renouvellement.

On ne doit pas perdre de vue d'ailleurs que dans le remplacement des rails et des coussinets, on n'a pas à dépenser une somme égale au prix d'achat primitif. En Angleterre, et la même chose aura lieu en France lorsque le besoin s'en fera sentir, les maîtres de forges remplacent poids pour poids les rails et les coussiuets usés au prix de 80 à 100 francs par tonne pour les rails, et de 40 à 45 francs pour les coussinets, c'est-à-dire pour les premiers un tiers du prix des matières neuves et pour les autres deux cinquièmes environ. On pourrait au besoin recourir à un emprunt pour faire face à une partie des dépenses de renouvellement, au moment où elles atteindront leur maximum d'intensité, et si elles dépassent la limite de ce qu'on peut faire raisonnablement supporter au revenu; cet emprunt serait remboursé dans une période suivante, dont l'expérience permettrait de fixer équitablement la durée; cette charge porterait alors sur les actionnaires appelés à jouir des profits croissants de l'exploitation.

Dans tous les cas, rien ne paraît justifier en France l'application du système du London and North-Western, qui a pour objet de faire payer aux premiers détenteurs des actions des dépenses qui constitueront pour leurs successeurs une charge beaucoup moins lourde que pour eux-mêmes.

Un système inverse, adopté en France dans un cas particulier, consiste à emprunter chaque année pour constituer un fonds de renouvellement, et à mettre le remboursement des sommes empruntées à la charge de la seconde moitié de la concession. Ce système est éminemment dangereux, car il a pour effet d'augmenter indéfiniment le capital effectif, de tarir la source du crédit de la compagnie, et peut arrêter celle-ci à une époque quelconque, dans une entreprise de première utilité; il a de plus l'inconvénient, comme le fonds de renouvellement créé par annuités, de répartir d'une manière artificielle et arbitraire des dépenses qu'on ne songerait jamais à distraire de l'entretien, si leur uniformité était assurée.

En résumé, la question du renouvellement de la voie, si les observations qui précèdent méritent d'être prises en considération, se réduit, pour les compagnies françaises, à un usage intelligent du fonds de réserve statutaire, qui ne devrait être employé que pour alléger les charges du revenu au moment où le remplacement des matériaux usés aurait le plus d'intensité, ou, si l'on veut accepter une comparaison géométrique, pour franchir le sommet de la courbe des dépenses annuelles, courbe qui tend de plus en plus à devenir rectiligne et parallèle à sa base, mais qui peut présenter un renflement un peu fort au moment où la majeure partie du renouvellement des premières traverses et des premiers rails aura lieu. Il est certain que lorsqu'on arrivera à la

fin d'une concession de cinquante années, par exemple, le renouvellement sera devenu très-uniforme et ne donnera plus lieu qu'à une dépense annuelle sensiblement constante comme l'entretien courant. Le système de l'annuité du London and North-Western, n'aurait d'application utile que pour des lignes de peu d'étendue, d'un trafic uniforme et concédées pour une courte durée.

Quelques compagnies anglaises ont un fonds de renouvellement spécial pour le matériel roulant; mais cette pratique est encore moins justifiable que celle du fonds de renouvellement de la voie, car l'expérience démontre que, soit par suite des accidents, soit par suite des modifications que réclame le service, soit par la diversité même du mode de construction, les machines locomotives et les waggons éprouvent des transformations successives, ou sont remplacés graduellement, et donnent lieu à une dépense sensiblement uniforme.

§ 6. *Entretien de la voie.*

Les procédés d'entretien ne diffèrent pas de ceux que l'on emploie partout ailleurs; on remarque seulement, en général, que l'entretien n'est pas très-soigné; les voies dérangées par le mouvement de lacet des machines circulant à grande vitesse, ou par le jeu des traverses de joint, sont souvent assez mauvaises. Cependant la locomotion est en général assez douce par suite du mode de suspension employé.

Sur beaucoup de chemins l'entretien de la voie est encore fait à l'entreprise; un ou plusieurs entrepreneurs sont chargés des différentes parties d'une même ligne, de la totalité ou d'une partie seulement des travaux; tantôt l'entrepreneur est chargé seulement de l'entretien proprement dit, la compagnie restant chargée

de fournir les matériaux à remplacer, tantôt il est chargé d'une partie du renouvellement. La tendance des compagnies est de ne pas renouveler ces traités au fur et à mesure de leur expiration ; l'expérience leur démontre que l'entretien en régie est plus économique. En effet, les dépenses de direction et de surveillance restent à peu près les mêmes dans l'un et l'autre cas, et lorsque l'entreprise ne comprend que l'entretien proprement dit, on ne voit pas trop en quoi l'industrie d'un entrepreneur peut l'emporter sur une régie bien dirigée. La mise à l'entreprise, si le prix de forfait n'excède pas de beaucoup la valeur même du travail effectué, ne peut avoir pour résultat qu'un entretien médiocre. Si l'on veut comprendre dans un traité de cette nature le remplacement des matériaux ou le renouvellement proprement dit, on tombe tellement dans l'imprévu, qu'il n'y a plus de saine appréciation possible des bases sur lesquelles un marché peut être établi. Enfin, la surveillance de la voie ne se combine peut-être d'une manière sûre avec l'entretien, que lorsqu'elle est faite en grande partie par les poseurs. L'entretien à forfait de la voie ne peut être utilement adopté que pour une première période d'exploitation, si l'entrepreneur de la construction ou seulement de la pose des voies, s'en charge à des conditions raisonnables ; car on l'intéresse ainsi d'une manière directe à poser la voie avec beaucoup de soin, ce qui a une influence marquée sur l'économie ultérieure des frais d'entretien, et jusqu'à un certain point, à fournir des matériaux de bonne qualité, si l'entreprise comprend la fourniture du ballast, des traverses, des rails, etc.

L'entretien de la voie à forfait a en outre un inconvénient très-marqué, commun, d'ailleurs, avec les traités que l'on peut faire pour les autres branches de l'exploi-

tation : c'est qu'il devient un obstacle pour l'application des améliorations que les chemins de fer reçoivent chaque jour, l'intérêt de l'entrepreneur se trouvant souvent en opposition avec celui de la compagnie, ou avec les nécessités de son service.

Les frais d'entretien de la voie sont très-variables; ils dépendent du mode de construction de la voie et de l'importance du trafic. M. W. Barlow a fait à ce sujet des recherches très-intéressantes qu'il a communiquées à l'institution des ingénieurs civils, dans sa séance du 14 mai 1850. Il a comparé le prix moyen d'entretien de la voie et des ouvrages du Midland en 1846, sous le régime des traités à forfait, avec les frais d'entretien en régie en 1849; il a trouvé que la dépense moyenne par kilomètre et par an était descendue de 3.728f,15 à 2.036f,50. Cette dernière somme se décompose de la manière suivante :

	fr.
Entretien des ateliers et de la station de Derby (voies de manœuvres comprises), des stations; frais généraux du service de la voie.	273,40
Entretien de la voie de fer proprement dite, sans le renouvellement.	1.763,10

Il a recherché ensuite comment se décomposait cette dernière somme entre les différentes sections, et a comparé le prix d'entretien de chacune d'elles avec l'importance du trafic; il est arrivé ainsi à former le tableau suivant :

NOMS DES SECTIONS.	LONGUEUR MOYENNE des voies entretenues.		FRAIS d'entretien par kilomètre et par an.	NOMBRE de trains moyens par semaine.
	Double voie	Simple voie.		
	kilom.	kilom.	fr.	
Nord-Midland.	118,335	2,012	2.468,35	303
Sheffield and Rotherham. .	9,660	1,610	2 297,48	306
Midland-Counties.	94,185	»	2.280,39	267
Syston and Peterborough.	61,582	»	1 443,11	109
Leicester and Swannington.	26,565	15,295	·888,54	83
Erewash-Walley.	21,533	14,691	818,64	65
Nottingham and Mansfield	7,647	»	781,36	65
Nottingham and Lincoln. .	57,356	»	978,64	92
Derby and Birmingham. . .	78,085	»	1.819,03	176
Bristol and Birmingham. .	131,215	6,843	1.789,52	152
Leeds and Bradford.	58,260	»	2,033,40	198

Ce tableau montre évidemment, ainsi que le fait remarquer M. W. Barlow, que les frais d'entretien de la voie de fer proprement dite (non compris les différents articles de dépense qui ont été séparés plus haut) sont matériellement affectés par le trafic. M. Barlow admet que les dépenses d'entretien occasionnées par les actions atmosphériques et les autres causes qui sont indépendantes du trafic, varient de 310 fr. 70 à 466 fr. par kilomètre, et s'élèvent en moyenne pour le Midland à 434f,95 par kilomètre, tandis que celles qui sont le résultat direct du trafic s'élèvent en moyenne à 0f,132 par kilomètre et par convoi (0f,124 à 0f,168), sur lesquels environ 0f,124 sont dus au dérangement occasionné dans la pose de la voie par le passage des trains; ce dernier chiffre doit du reste varier beaucoup avec le système de construction de la voie. Les auteurs des différents systèmes employés dans ces derniers temps pour la consolidation des voies établissent tous que leur système présente une économie considérable sur les frais d'entretien proprement dits; on peut admettre que cette économie est d'environ 30 à 50 p. 100 sur les prix qui précèdent pour le joint à

éclisses de Samuel, les supports en fonte de M. P. Barlow, et surtout pour les rails à large base de M. W. Barlow.

Le rapport de la commission du London and North-Western fournit encore quelques exemples de décomposition des frais d'entretien et d'application des traités à forfait. Sur la division du Grand-Junction, l'entrepreneur, M. Allcard, est chargé de l'entretien de la voie et des ouvrages d'art, et du renouvellement de la voie, à raison de 2.563^{f},30 par kilomètre pour le Grand-Junction et la ligne de Crewe à Chester, et de 4.038^{f},85 par kilomètre pour la ligne de Liverpool à Manchester; l'entrepreneur remplace tout les matériaux hors de service, à l'exception des rails et des coussinets; les deux cinquièmes environ de cette section sont posés sur dés en pierre. La dépense moyenne s'est élevée par kilomètre :

	fr.
Pour l'entretien de la voie à *forfait*, à.	2.998,05
Pour l'entretien des bâtiments de toute nature, à. . .	279,60
Total.	3.277,65

Sur la division de Londres à Birmingham, la compagnie a un entrepreneur pour la fourniture du ballast et le transport des matériaux, auquel elle fournit le matériel de transport dont il paye l'intérêt à 5 p. 100, et auquel elle donne les remises et ateliers nécessaires pour l'entretien moyennant un loyer annuel de . . . . 3.262^{f},45

Elle lui paye pour le transport par wagon et par kilomètre.	0,20
Pour chargement et déchargement de matériaux, y compris l'extraction du ballast, par wagon et par kilomètre.	1,92

Pour fourniture de gravier criblé, par wagon et par kilomètre.	6,00
Et enfin pour l'usage d'une machine et de douze wagons, y compris le personnel et les matières consommées, par jour.	112,50

D'autres entrepreneurs, qui reçoivent du précédent le ballast et les matériaux à pied d'œuvre, sont chargés de l'entretien proprement dit de la voie, à des prix variables pour les différentes sections, savoir :

	Par kilomètre et par an. fr.
De Londres à Wolwerton (ligne principale).	2,563,10
De Wolwerton à Birmingham (ligne principale). . .	1,924,66
Embranchement d'Aylesbury (simple voie).	1.073,40
— de Bedford (double voie).	2.112,60
— de Leamington (simple voie). . . .	965,95
— de Peterborough (double voie). . .	1.274,30

La réparation des ouvrages d'art, des gares de marchandises, des plaques tournantes et engins, et des stations de voyageurs, est payée à part. En 1848, pour un développement de 290 kilomètres, la dépense de la section de Londres à Birmingham s'est élevée, par kilomètre, au chiffre suivant :

	fr.
Entretien de la voie et des ouvrages d'art, non compris le renouvellement des rails, etc.	3.182,25
Entretien des bâtiments des stations et des engins. .	466,30
Total.	3.648,55

Sur la section de Manchester à Birmingham, où les travaux se font en régie, les dépenses d'entretien se sont également élevées par kilomètre, en 1848 (sans renouvellement) :

	fr.
1° Pour la voie et les ouvrages d'art, à.	1.205,05
2° Pour les bâtiments des stations et engins.	406,05
Total.	1.611,10

J'ai cherché, pour compléter les renseignements qui précèdent, à extraire des comptes rendus des compagnies à leurs actionnaires, les dépenses d'entretien de la voie, en classant ces dépenses par catégories, et en distinguant autant que possible ce qui appartient à l'entretien proprement dit et au renouvellement. Je donnerai plus loin le tableau des recettes brutes par kilomètre des différentes lignes; au moyen de ce renseignement, on pourra se rendre compte de l'importance relative de la circulation sur les différentes lignes, et apprécier l'un des éléments qui contribuent à faire varier d'une ligne à l'autre les dépenses d'entretien.

Tableau des dépenses d'entretien, par kilomètre de longueur, de la voie de fer, des ouvrages et des bâtiments des stations en 1850.

DÉSIGNATION DES CHEMINS.	Longueur entretenue.	DÉPENSES D'ENTRETIEN. Frais généraux.	Voie de fer.	Ouvrages.	Bâtiments des stations.	Divers.	Total.	Renouvellement de la voie.	Total général.	OBSERVATIONS.
	kilom.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	
London, Brighton, and South-Coast. .	144,2	92,39	1.756,32		399,71	47,54	2.295,96	533,78	2.829,74	(a)
Lancashire and Yorkshire.	327,4	»	»	»	»	»	3.024,50	453,10	3.477,70	
East-Lancashire.	127,1	134,80	1.636,60	22,10	97,40	»	1.890,90	49,60	1.940,50	
York, Newcastle, and Berwick.	466,6	»	»	»	»	»	1.929,50	»	»	(b)
Great-Northern.	230,1	»	1.432,70		258,50	»	1.691,20	»	»	(c)
South-Eastern.	394,2	1.245,40		255,50	111,30	65,40	1.677,60	467,90	2.145,50	
London and South-Western.	389,4	48,80	3.336,40		250,20	»	3.635,40	»	»	(d)
Midland.	799,7	107,40	1.578,90		164,90	27,20	1.878,40	413,10	2 291,50	(e)
Eastern-Counties.	518,1	»	»	»	»	»	1.871,10	834,40	2.705,50	
London and North-Western.	769,1	176,50	2,517 60		323,10	»	3.017,20	696,60	3.713,80	(f)

(a) Sur la longueur totale 26k,95 sont à simple voie.
(b) Les dépenses de renouvellement sont encore peu importantes et sont comprises dans l'entretien.
(c) Même observation.
(d) L'entretien de la voie et des ouvrages a été fait à l'entreprise; les traités d'entretien comprenaient l'achèvement de certains ouvrages.
(e) L'entretien du télégraphe électrique a coûté en outre 11 fr. par kil.
(f) 30k,57 sont à simple voie. L'entretien du télégraphe électrique a coûté en outre 35f,50 par kilomètre. Une grande partie du chemin est entretenue à l'entreprise (voir page 103)

En ne prenant dans ce tableau que les chemins dont la fréquentation n'est pas exceptionnelle, et dont le prix d'entretien n'est pas celui d'entreprises faites à des conditions onéreuses ou exceptionnelles, on trouve que le prix de l'entretien annuel sans le renouvellement varie de 1700 à 1900 fr. environ, nombres qui peuvent être pris comme terme de comparaison de l'exploitation anglaise avec celle de nos chemins de fer.

NOTICE

sur le

DISTRICT MÉTALLIFÈRE DU MONCAYO, DANS LE ROYAUME D'ARAGON.

Par M. J.-M. LEITÃO, ingénieur des mines en Espagne.

Le district métallifère du Moncayo est un de ceux dont la richesse offre le plus d'avenir à l'Espagne. Il renferme en lui tous les germes de prospérité industrielle ; pour les développer il ne manque qu'une chose : des capitaux.

Nous comprenons dans ce district les groupes métallifères d'Ateca, de Montende, de Santa-Cruz, de Frasno, de Mesones, d'Aranda et de Calcena, ainsi que le bassin houiller moderne de Torrelapaja.

Les minerais dominants sont : les pyrites cuivreuses associées à un mélange d'oxydes de cuivre et de fer, des fahlerz pauvres ou très-riches en argent, de la galène en général peu argentifère, du sulfure d'antimoine, et du fer oligiste.

Les forêts de pins de Soria, celles de chênes verts (*ilex*) de la partie montagneuse du district qui avoisine le Moncayo, les peupliers et les aulnes des vallées, et les dépôts carbonifères de Torrelapaja, fourniraient le bois d'œuvre et le combustible. Il ne manque pas dans le district de rivières dont les sources, à régime presque constant, sont assez abondantes en toute saison pour pouvoir être employées avec régularité comme forces motrices. Enfin, les limites du district sont en

contact, à l'est avec le canal impérial d'Aragon, au nord et au sud avec les routes, qui vont de Madrid par Sudèle à Pampelune, et par Saragosse à Barcelone. Ces grandes lignes étant les débouchés principaux des trois ports, seraient rendues de plus en plus faciles par un réseau intérieur de communications, qui ne tarderait pas à être créé par le mouvement industriel.

Les nombreuses entreprises d'exploitation qui se sont formées depuis quelque temps n'ont fait qu'effleurer une partie des gîtes innombrables du district. De toutes les entreprises existantes, celle qui a donné le plus d'impulsion à ses travaux, est la compagnie *Union y Constancia*, qui exploite une mine connue sous le nom de Mensula. Cette mine est située sur la pente orientale du Moncayo, à douze lieues à l'ouest de Saragosse, près du petit village de Calcena. Son champ d'exploitation se compose de sept concessions (1) formant en tout une surface rectangulaire de 1.755 mètres sur 167.

Les trois filons reconnus jusqu'à ce jour sont compris dans une zone de 100 mètres de largeur, et suivent en général le grand axe des concessions.

Leur direction générale, O. 10° N.-O., paraît suivre celle de la vallée principale, qui porte le nom significatif de Barranco de Val-de-Plata. Le filon du sud et le filon central s'inclinant l'un vers l'autre, finiraient par se rencontrer à 20 mètres au-dessous de la galerie d'écoulement, si leur inclinaison restait constante; mais généralement elle augmente avec la profondeur, et s'approche peu à peu de la verticale.

Les filons ont éprouvé des dérangements fréquents produits par une multitude de petits croiseurs qui les

---

(1) Une concession (*pertenencia*) est un rectangle de 200 à 300 varas castillanes.

coupent sous des angles variables de 30° à 70°. Les rejets ne dépassent presque jamais la largeur des galeries d'allongement, et lorsqu'ils sont plus considérables on rencontre toujours le filon du côté de l'angle obtus. Ces croiseurs sont des cassures étroites remplies de débris décomposés des épontes. On n'y trouve du minerai qu'au point de croisement, et toujours en petite quantité.

Les travaux de recherche pratiqués sur plusieurs points du filon du sud, assurent déjà sa continuité en direction sur une longueur de plus de 500 mètres. Suivant l'inclinaison, le filon a été reconnu à 41 mètres au-dessous de l'orifice du puits principal.

Le filon central a été exploré sur une longueur plus grande encore, mais surtout par des recherches superficielles. Les plus profondes sont à peine au-dessous du niveau de la vallée principale.

Le filon du nord n'a été mis à découvert que sur un point de son affleurement. Ses caractères sont semblables à ceux des deux premiers.

La puissance du filon du sud, très-variable tant en direction qu'en inclinaison, n'a jamais dépassé $0^m,60$; elle paraît être de $0^m,20$ en moyenne. La puissance du filon central est généralement plus considérable; elle atteint quelquefois $1^m,60$.

La masse qui remplit les deux filons est la même; la proportion des principes constituants diffère seule. Dans le filon du sud le cuivre gris domine, la galène n'y étant qu'au second rang. Dans le filon central, au contraire, la galène prend le dessus, et le cuivre gris devient accidentel.

La gangue du premier filon, dans la région orientale, se compose presque exclusivement de quartz, ou de fragments plus ou moins décomposés du terrain encaissant.

Le cuivre gris y est compacte, continu et riche en argent, et la galène se présente toujours en veines séparées. Cet isolement entre la galène et le fahlerz s'observe du reste partout dans le filon, comme si ces minerais n'étaient pas contemporains. Dans la région occidentale, le quartz en s'associant au fer carbonaté cristallin et au sulfate de baryte compacte, devient plus lucide et même hyalin, et renferme des druses tapissées de cristaux de pyrite de cuivre, de fahlerz, de baryte sulfatée et de carbonate de fer. La structure massive et fragmentaire se change en structure rubanée; le fahlerz, notablement appauvri, se présente en veines peu continues, la pyrite de cuivre compacte accompagne le fahlerz, et la galène disparaît complétement. Les salbandes présentent des surfaces striées avec un éclat métallique dû à la pyrite cuivreuse, et on y remarque, comme partout du reste, des lisières d'une argile grasse, blanche ou noirâtre.

Le rubannement n'a pas encore été observé d'une manière aussi nette dans le filon central. La galène s'y montre rarement en veines; ordinairement elle se trouve éparpillée au milieu du quartz, qui devient la gangue dominante. Le cuivre gris, en veines étroites et en petite quantité, y est beaucoup plus riche en argent que partout ailleurs.

Dans le filon du sud on explore un massif de fahlerz compacte, qui est déjà reconnu sur 23 mètres en profondeur, et en direction sur une longueur de 80 mètres. Une galerie d'allongement poussée dans le massif à 41 mètres au-dessous de l'orifice du puits principal, représente la plus grande profondeur des travaux, et forme le second étage de la mine. Elle n'a pas encore atteint la limite du massif du côté de l'est. Avec une puissance de $0^m,10$ à $0^m,40$, le filon a produit dans ce

travail de recherche, une moyenne de 500 kilogrammes de cuivre gris par mètre quarré.

Les autres travaux d'exploration, tous à l'ouest de ce massif, n'ont traversé jusqu'ici que les régions stériles ou peu productives. Le minerai ne s'y présente pas encore d'une manière assez continue pour qu'on y puisse établir des ateliers d'abattage.

Voilà à peu près tout ce que l'on peut dire sur l'allure et la composition des gîtes, et sur la distribution des minerais. Les travaux étant peu étendus, les faits observés sont encore trop restreints pour que l'on puisse en déduire des lois générales, si ce n'est que ces gîtes appartiennent à la classe des filons réguliers. Mais cette conséquence est déjà très-précieuse, car, si elle ne dit rien de certain pour l'avenir sur l'abondance, la richesse et la manière d'être du minerai; elle doit du moins rassurer l'exploitant sur un point de la plus haute importance : la continuité régulière des gîtes.

Le cuivre gris du grand massif du filon du sud a été souvent essayé par la voie sèche au laboratoire de la compagnie. Les échantillons les plus purs, tirés à des profondeurs et à des distances horizontales différentes, du même massif, ont produit 0,28 à 0,30 de cuivre, et 0,0040625 à 0,00625 d'argent. Teneur des minerais.

Dans le même filon, à plus de 200 mètres à l'ouest du massif, le cuivre gris ne donne à l'essai qu'une moyenne de 0,32 de cuivre et 0,00232 d'argent.

Le fahlerz du filon central a donné 0,25 de cuivre, 0,008437 d'argent.

Voici les résultats obtenus par M. Margueritte dans un essai par la voie humide du minerai du filon central :

Cuivre.	0,252
Argent.	0,01074

En le soumettant à une analyse qualitative, il a trouvé :

Soufre.	Fer.
Arsenic.	Étain.
Antimoine.	Silice.
Plomb.	Alumine.
Zinc.	Chaux.

Le plomb provient d'un peu de galène. Quant à l'étain, nous croyons que c'est la première fois qu'on en trouve dans le fahlerz.

Analyse faite au bureau d'essai de l'École des mines de Paris.

Soufre	0,243
Plomb	0,008
Fer	0,059
Cuivre	0,382
Antimoine et arsenic	0,255
Étain	une trace.
Gangue	0,033
	0,980

Ce cuivre gris est riche en argent : l'essai a donné 84 grammes sur 100 kilogr. de minerai, ou 0,00484.

Terrain encaissant. Les filons traversent les couches relevées d'un grès rouge très-chargé de mica, tantôt mêlé aux grains quartzeux d'une manière confuse, tantôt couché à plat suivant les plans de stratification, et rendant fissiles les couches supérieures à grain plus fin et un peu plus argileuses. La pente de ces couches est très-variable ; elle semble rayonner dans les alentours de la mine, comme autour d'un centre de soulèvement. Le grès s'enfonce sous les couches inclinées du calcaire jurassique, mais on ignore sur quel terrain il repose. Les roches soulevantes et métallifères sont probablement les trapps qui affleurent çà et là à quelque distance de la mine, au milieu des calcaires.

NOTICE

SUR DIVERS APPAREILS DE SURETÉ APPLICABLES AUX CHAUDIÈRES A VAPEUR.

(Extraite des Avis de la commission centrale des machines à vapeur.)

1° Indicateur du niveau d'eau,

Par M. DESBORDES.

Il importe, pour la bonne conduite des appareils à vapeur, de connaître à chaque instant la hauteur du plan d'eau dans la chaudière.

Un défaut d'alimentation peut amener une explosion, et d'autre part, si l'on alimente avec excès, il peut en résulter un entraînement d'eau nuisible à la marche de la machine.

Trois indicateurs du niveau d'eau sont employés : le flotteur, les robinets étagés et le tube en verre.

L'ordonnance du 22 mai 1843 (art. 31) a prescrit, pour toute chaudière à vapeur, l'emploi d'un quelconque des trois indicateurs usités.

La circulaire du 4 octobre 1847 a modifié cette disposition ; elle n'admet le flotteur que comme moyen subsidiaire ; elle donne la préférence au tube en verre, malgré les plaintes nombreuses dont il a été l'objet.

Cet instrument est, en effet, très-fragile, le tube se brise souvent, malgré tout le soin que l'on apporte à le bien choisir, à le faire recuire, à le monter d'une manière convenable.

Lorsque cet accident arrive, il y a de l'eau chaude

projetée au dehors, le chauffeur peut être atteint et grièvement brûlé.

M. Desbordes, fabricant d'instruments à Paris, a soumis à l'appréciation de M. le ministre des travaux publics, un nouvel indicateur, qui lui paraît offrir les avantages du tube ordinaire sans en avoir la fragilité.

Cet instrument, Pl. I, *fig.* 7 et 8, se compose d'un tube ou clarinette en laiton mis en communication avec la chaudière au moyen de deux tubulures; il porte sept robinets : trois d'entre eux peuvent être consultés pour faire connaître le niveau d'eau dans la chaudière, dans le cas où le flotteur ne fonctionnerait pas.

Il est surmonté d'un tube en cristal fermé à la partie supérieure, et préservé des chocs par trois tringles qui, d'ailleurs, retiendraient les fragments en cas de rupture.

Dans l'intérieur de la clarinette se meut un petit flotteur métallique *f*, étamé, très-mobile, lié par un fil de laiton étamé, à une petite boule de verre coloré *c*, placée dans le tube de cristal, et qui sert à faire connaître la hauteur du niveau d'eau dans la chaudière.

Le tube de cristal a son extrémité inférieure au-dessus du plan d'eau dans la chaudière; il n'est baigné par le liquide dans aucune de ses parties; l'extrémité supérieure est d'ailleurs complétement libre; elle n'est appuyée contre aucun obstacle : le verre peut se dilater, se contracter, sans éprouver la moindre résistance.

Des appareils de ce genre ont été placés dans plusieurs établissements; ils n'ont pas donné d'abord d'aussi bons résultats que l'inventeur l'espérait; plusieurs se sont dérangés après quelques jours d'usage : des flotteurs se sont écrasés sous la pression de la vapeur, des tubes même se sont cassés.

On réussit aujourd'hui à faire des petits flotteurs qui

résistent bien à une pression d'épreuve de 7 ou 8 atmosphères.

Il y a des flotteurs qui fonctionnent depuis plus de deux mois sous une pression de 5 atmosphères sans s'être déformés : il est problable qu'ils auront une grande durée.

Les tubes de cristal paraissent aussi résister très-bien. Il est probable que si l'on en a cassé quelques-uns d'abord, c'est que l'on a mis peu de soin à les choisir.

Ils semblent beaucoup moins exposés à se briser lorsqu'ils ne sont pas baignés par l'eau, lorsqu'ils sont seulement en contact avec la vapeur.

Si la rupture a lieu, il y a d'ailleurs cet avantage que le verre n'éclate pas, qu'il n'y a pas projection d'eau chaude au dehors ; le chauffeur n'est pas brûlé, il peut fermer sans difficulté les robinets qui mettent le tube en communication avec la chaudière.

Lorsque cet appareil se dérange, il est toujours facile de le réparer, même pendant la marche.

On peut retirer le flotteur écrasé, changer le tube cassé, et avoir de suite un indicateur du niveau d'eau en bon état, pourvu que l'on ait la précaution d'avoir dans l'atelier des tubes et des flotteurs de rechange.

L'instrument est vérifiable à tout instant ; on peut retirer le flotteur par la partie inférieure du tube, et s'assurer ainsi s'il fonctionne librement.

Il y a enfin des robinets-jauge qui peuvent faire connaître le niveau d'eau lorsque le tube est cassé.

En résumé :

1° L'appareil imaginé par M. Desbordes, pour indiquer le niveau d'eau dans une chaudière à vapeur, est moins sujet à se briser que le tube en verre ordinaire.

2° En cas de rupture, le chauffeur peut fermer les robinets de communication avec la chaudière sans être exposé à être brûlé par un jet d'eau chaude, comme il

l'est lorsqu'une partie du tube est placée au-dessous du plan d'eau dans la chaudière à vapeur.

3° Il est facile de faire à cet appareil toutes les réparations nécessaires sans arrêter le feu.

4° Il est facile à tout instant de vérifier si le flotteur fonctionne bien, s'il donne des indications exactes.

5° Dans le cas où le tube vient à casser, on peut encore connaître approximativement la hauteur du plan d'eau, au moyen des robinets-jauge dont cet appareil est muni.

Par ces motifs, l'indicateur du niveau d'eau de M. Desbordes peut être employé avec avantage sur les chaudières à vapeur.

L'ingénieur en chef, secrétaire,
T. LORIEUX.

L'inspecteur général des mines,
président de la commission,
L. CORDIER.

2° Appareil destiné à prévenir les conséquences de l'abaissement du niveau d'eau.

M. Black, mécanicien à Cambrai, a imaginé un appareil très-simple qui est destiné, comme le flotteur d'alarme, à donner un avertissement, lorsque le plan d'eau, dans une chaudière à vapeur, est descendu au-dessous d'une hauteur fixée.

Cet appareil (Pl. I, *fig.* 13, 14, 15 et 16) se compose essentiellement d'un tube de cuivre qui porte une rondelle de métal fusible à 100°, et disposée de manière à fondre aussitôt que le plan d'eau se trouve abaissé au-dessous d'une hauteur déterminée.

La partie inférieure du tube a la forme d'un tronc de cône; elle plonge dans la chaudière : elle est surmontée à l'extérieur par une partie cylindrique droite et haute

de $0^m,70$; le tuyau se termine par trois ou quatre tours d'hélice.

L'inventeur propose d'appliquer à chaque chaudière deux appareils du même genre.

L'un servirait lorsque le plan d'eau tombe au-dessous de la hauteur normale; l'autre fournirait des indications dans le cas seulement où l'abaissement de l'eau serait devenu tel, qu'il y aurait danger imminent d'explosion de la chaudière, si, dans cet état, on venait à l'alimenter.

Le premier appareil (*fig.* 15 et 16) est muni de robinets; on peut l'empêcher de fonctionner et intercepter la communication du tube avec la chaudière; on peut y remplacer une rondelle fondue par une autre de même forme et de même composition.

Le chauffeur n'est pas libre d'arrêter le jeu de l'autre appareil (*fig.* 13 et 14); si la rondelle vient à se fondre, il doit jeter le feu et arrêter les machines.

Cet appareil a été essayé, en présence de la commission, dans les ateliers des Messageries nationales; l'expérience a été satisfaisante.

Il est facile de se rendre compte des résultats qu'il donne.

Tant que le plan d'eau dans la chaudière se trouve au-dessus de l'orifice du tube, celui-ci reste plein d'eau sous toute pression effective de vapeur supérieure à un dixième d'atmosphère. La température s'y maintient alors beaucoup au-dessous de celle qui existe dans l'intérieur de la chaudière, parce qu'il se perd beaucoup de chaleur par la grande étendue superficielle que présente le tuyau ($0^{mq},2033$), et que la circulation d'eau s'y fait mal, parce qu'il n'offre qu'une section étroite ($0^m,035$ de diamètre), et qu'un seul orifice, à l'eau qui monte et à celle qui descend.

Mais aussitôt que le plan d'eau s'abaisse au-dessous de l'orifice du tube, la vapeur y pénètre; elle se condense sur les parois, elle leur transmet toute la chaleur qu'elle renferme; elle communique promptement à la rondelle fusible la température nécessaire pour en opérer la fusion.

Cet appareil est d'une construction simple, il se place facilement sur les chaudières, il ne demande aucun soin d'entretien; mais il ne peut être facilement vérifié : on ne peut s'assurer à tout instant si la rondelle de métal employée est réellement fusible à 100°.

Il paraît inutile d'employer deux appareils de ce genre : l'un, pour faire connaître si le niveau d'eau est au-dessous de la hauteur normale; l'autre, pour signaler qu'il y a danger imminent d'explosion.

Un seul des appareils peut être employé pour remplacer le flotteur d'alarme, pourvu que l'on ait soin d'y adapter un sifflet qui fasse entendre un bruit aigu lorsque la vapeur s'est ouvert une issue dans l'atmosphère.

M. Black vient d'ajouter à son appareil le perfectionnement indiqué par la commission. La rondelle, toujours placée à $0^m,80$ au-dessus de la chaudière, est recouverte d'une plaque de cuivre percée de trous, dont la section totale est de 2 centimètres quarrés. A un de ces trous, est adapté un tube de cuivre de $0^m,01$ de diamètre, de $0^m,08$ de long et fermé à l'extrémité supérieure. Une échancrure à biseau, pratiquée dans sa paroi, produit, lorsque la vapeur s'écoule, un sifflement aigu.

Dans sa séance du 13 février 1852, la commission a reconnu que cette disposition simple et économique remplit bien son objet.

Mais l'appareil ne saurait néanmoins remplacer les in-

dicateurs comme le tube en verre, le flotteur ordinaire, les robinets étagés, qui servent à faire connaître à chaque instant la hauteur du plan d'eau dans la chaudière; il est douteux même qu'il doive être préféré à toute espèce de flotteur d'alarme. Car, s'il est vrai que souvent l'on en trouve qui sont hors d'état de donner aucune indication, il convient d'ajouter que ce reproche doit être fait surtout aux appareils de ce genre dont le mécanisme est placé à l'intérieur de la chaudière; mais on fait aujourd'hui des flotteurs d'alarme autrement disposés, qui peuvent être facilement vérifiés à tout instant, et qui sont généralement entretenus d'une manière satisfaisante.

En résumé :

1° L'appareil de M. Black est ingénieux, et sa disposition bien entendue; il peut être employé avec avantage pour signaler un trop grand abaissement du plan d'eau dans les chaudières à vapeur.

2° Il est inutile d'employer deux appareils du même genre pour une seule chaudière; il est même préférable de n'en employer qu'un seul.

3° Avec l'addition du sifflet, il peut tenir lieu du flotteur d'alarme, et être considéré comme satisfaisant aux prescriptions de l'article 30 de l'ordonnance du 22 mai 1843.

4° Il y a lieu, de la part de M. le ministre des travaux publics, d'en autoriser l'usage par une circulaire.

L'ingénieur en chef, secrétaire,
T. Lorieux.

L'inspecteur général des mines,
président de la commission,
L. Cordier.

3° Tube indicateur de M. Dietz.

M. Dietz, chef de dépôt au chemin de fer de Paris à Lyon, a imaginé une disposition dans le but de prévenir le danger que présente l'emploi du tube indicateur du niveau d'eau sur les chaudières à vapeur; lorsque ce tube vient à se briser, l'eau chaude est projetée au dehors, le chauffeur peut en être atteint et grièvement brûlé.

Pour éviter cet accident, M. Dietz place sur le petit tuyau inférieur, qui met le tube de verre en communication avec l'eau de la chaudière, une petite soupape *s*, Pl. I, *fig.* 9 et 11, qui retombe par son poids, et laisse passage à l'eau dans le tube, lorsque la pression est égale en dessus et en dessous; mais si le tube vient à se rompre, la soupape est pressée plus fortement en dessous qu'en dessus; elle vient d'elle-même fermer toute issue à l'eau au dehors, de manière à intercepter toute communication entre le tube indicateur du niveau d'eau et la chaudière à vapeur.

Cette disposition (*fig.* 9, 10, 11 et 12) a été appliquée aux locomotives du chemin de fer de Paris à Lyon; on a fait beaucoup d'essais, brisé plusieurs fois des tubes, sans qu'il en soit jamais résulté aucun inconvénient pour les personnes qui se trouvaient près de la chaudière.

Cet appareil paraît, en conséquence, mériter d'être porté à la connaissance des ingénieurs et des industriels.

L'ingénieur en chef des mines,
secrétaire, T. Lorieux.

L'inspecteur général des mines,
président de la commission,
L. Cordier.

NOTES MINÉRALOGIQUES,

Par M. A. DAUBRÉE, ingénieur des mines.

1° Note sur la forme des cristaux obtenus par la condensation lente de la vapeur de soufre au-dessous de 90 degrés.

Jusqu'à présent on n'a pu faire cristalliser artificiellement le soufre que par voie de fusion ou à l'aide d'un dissolvant liquide, tel que le sulfure de carbone. La condensation directe de la vapeur de ce corps ne fournit en général qu'une poussière très-fine et amorphe qui est connue sous le nom de fleur de soufre. Voici cependant une condition dans laquelle le refroidissement de la vapeur de soufre est assez lent pour produire des cristaux fort nets.

Dans une fabrique située au Contades, près de Strasbourg, où l'acide sulfurique se prépare par le procédé anglais, le fourneau à soufre, qui est presque en totalité construit en briques, a l'une de ses parois formée avec de l'argile sablonneuse. Cette terre glaise contient un grand nombre de petites vacuoles qui sont très-reconnaissables même à l'œil nu.

C'est dans cette paroi d'argile poreuse, dont l'épaisseur est de 15 centimètres, que se rencontrent assez fréquemment, outre des veines de soufre amorphe, de petits cristaux de soufre, accompagnés de veines de la même substance à l'état amorphe. Bien que ces cristaux n'aient pas plus d'un millimètre de longueur, il est facile de reconnaître qu'ils ont la forme d'un octaèdre droit à

base rhombe qui porte des troncatures symétriques sur les deux extrémités de l'axe principal : leur forme est donc la même que celle des cristaux naturels. De même que le soufre de la nature, les cristaux dont il s'agit se distinguent aussi du soufre obtenu par voie de fusion par une transparence qu'ils conservent indéfiniment; leur éclat est d'ailleurs très-vif. Dans une même fissvre, ils sont souvent tous orientés parallèlement les uns aux autres, comme on l'observe dans les échantillons de la solfatare de Pouzzoles, avec lesquels ils présentent une telle ressemblance de physionomie que l'œil d'un minéralogiste serait trompé par cette sorte de contrefaçon.

Dans les petites veines isolées où on l'observe, le soufre ne peut avoir pénétré à l'état fondu; il s'est certainement insinué à l'état de vapeur, soit libre, soit combiné. On admet que le soufre des volcans est amené des profondeurs à l'état de gaz sulfhydrique qui par la combustion lente de son hydrogène dépose du soufre. Dans le fourneau dont il est question, où le soufre est chauffé en présence de l'air et du nitre, il est évident qu'il ne se forme pas d'acide sulfhydrique; il ne peut se produire que des composés oxygénés de soufre; mais lors même que l'acide sulfureux gazeux pénétrerait dans l'argile, il ne pourrait fournir de soufre par sa décomposition, puisqu'il n'y rencontre aucune substance réductrice. Les cristaux observés ne peuvent évidemment résulter que de la condensation directe de la vapeur de soufre qui s'exhale du fourneau et qui s'infiltre sans cesse dans les petits interstices et les pores de l'argile. A quelques millimètres de la surface du fourneau, la température de la paroi ne dépasse pas 80°, c'est-à-dire qu'elle est inférieure au point de fusion du soufre. C'est là que les gaz qui étaient saturés de vapeur de soufre à une température plus élevée

viennent déposer directement ce corps à l'état solide. Comme la quantité de vapeur de soufre qui sature le gaz à 80° est très-faible, et que leur refroidissement est d'ailleurs tout à fait graduel, la cristallisation se trouve favorisée par ces circonstances. Il faut ajouter qu'une grande partie du soufre qui s'accumule dans la région chaude de la paroi passe par l'état de fusion et ne présente rien de particulier. Ce n'est que tout près de la surface extérieure du fourneau que la vapeur de soufre se précipite à une température assez basse pour cristalliser un octaèdre droit, comme on vient de le dire.

En résumé, des cristaux de soufre peuvent se déposer dans des points où la température est inférieure de beaucoup, non-seulement au degré d'ébullition, mais aussi au point de fusion de ce corps. Cette observation est susceptible d'être utilisée pour obtenir des cristaux distincts par la condensation de certaines vapeurs, en les laissant filtrer avec lenteur dans une masse d'argile poreuse dont la température décroît très-graduellement. On se rapprochera d'ailleurs de cette manière des conditions qui, selon toute vraisemblance, ont eu lieu dans certaines émanations naturelles.

2° Sur un nouveau gisement de Berthiérite dans les Vosges.

Il existe dans la commune de Lalaye (Bas-Rhin) des filons d'antimoine qui traversent le schiste de transition. Dans ces filons l'antimoine sulfuré se rencontre en blocs massifs, pesant souvent plusieurs kilogrammes; il est accompagné vers ses affleurements de l'oxisulfure rouge ou kermès minéral et d'acide antimonieux. Le minerai forme un faisceau de veinules qui se ramifient les unes dans les autres en cimentant de nombreux fragments de schiste argileux; du quartz, de la

pyrite de fer et du fer spathique sont aussi mélangés au minerai d'antimoine.

Le filon d'antimoine dont il s'agit appartient au groupe de filons de cuivre, d'argent et de plomb des environs d'Urbeis.

C'est au milieu du sulfure d'antimoine auquel il est intimément mélangé que l'on rencontre un minéral gris d'acier, qui n'est pas lamelleux comme l'antimoine sulfuré ordinaire. Ce second minéral devient magnétique par la calcination. D'après l'examen que j'en ai fait, l'antimoine et le fer y sont renfermés dans la proportion de 32 à 18. Ainsi le sesquisulfure d'antimoine et le protosulfure de fer paraissent y être combinés équivalent à équivalent, comme dans la berthiérite de Braunsdorf en Saxe, et dans celle d'Anglar (Creuse). La berthiérite de Lalaye renferme en outre de l'arsenic et une faible quantité de zinc.

Les recherches ont été faites à diverses reprises sur les filons d'antimoine de Lalaye, dans les cantons de Charbe et de Honilgoutte. Ces filons atteignent une épaisseur de 1 mètre à 1^{m},50 ; considérés dans quelques-unes de leurs parties, ils couvriraient les frais d'exploitation ; malheureusement ils sont très-peu étendus dans le sens horizontal, soit qu'ils se perdent en ramifications, soit qu'ils s'interrompent brusquement.

3° Production artificielle de la Hausmanite.

En décomposant le protochlorure de manganèse par la vapeur d'eau à la chaleur rouge dans un tube de porcelaine, j'ai obtenu l'oxyde rouge de manganèse cristallisé en petits octaèdres réguliers qui ont la forme de l'oxyde naturel ou hausmanite.

SUR LA PRODUCTION

DES MINES DE SUÈDE PENDANT L'ANNÉE 1849.

(Extrait de l'ouvrage intitulé :

Rapport annuel du Collége des mines de Suède.)

La branche la plus importante de l'industrie minérale de la Suède a pour objet la production du fer. Les principales mines de fer se trouvent dans les provinces de Wermland, Orebro, Westmanland, Kopparberg et Upland : toutes les mines réunies ont produit en 1849 1.502.537 skipf. (2.932.952 q. m.).

Pendant la même année, 198 hauts-fourneaux en activité ont produit : 607.223 skipf. (1.185.300 q. m.) de fonte.

1.313 feux d'affinerie et 9 fours à puddler ont produit 638.827 skipf. (868.805 q. m.) de fer forgé. Sur cette quantité, il a été expédié à l'étranger en fer en barres et en fer ouvré 595.974 skipf. (810.525 q. m.), c'est-à-dire les 9/10 environ de la production. La Suède est le seul pays de l'Europe qui exporte une si grande proportion du produit de ses forges, et cette anomalie remarquable est due essentiellement à la qualité supérieure des fers produits, particulièrement de ceux qui sont employés en Angleterre pour la production de l'acier, et qui sont connus depuis quelques années sous le nom spécial de *fers à acier* (voir *Annales des mines*, 4e série, t. IX, p. 113). Les fabricants de Sheffield ont su tirer du fer à acier de la Suède les avantages analogues à ceux que les fabricants de Manchester et de

Glasgow obtiennent en mettant en œuvre le coton américain ; la renommée des aciéries anglaises, l'immense commerce auquel elles donnent lieu, n'ont pas d'autres bases que l'exportation du fer suédois. Les États-Unis d'Amérique, qui dans ces derniers temps ont fait de si grands progrès dans l'art de fabriquer et d'ouvrer l'acier, commencent à s'assurer les mêmes moyens de succès que l'Angleterre s'est acquis depuis deux siècles. Les chiffres suivants donnent les quantités de fer en barres exportées pour les principaux pays de destination, et prouvent que la France ne vient qu'au cinquième rang parmi les contrées qui reçoivent le fer suédois :

	skipf.	q. m.
Grande-Bretagne et Irlande	177.706	241.680
Amérique du Nord	131.453	178.776
Danemark	48.298	65.685
Portugal, Madère, Açores, etc.	32.743	44.530
France	30.439	41.397
Pays divers	129.369	175.942
	559.000	748.010

Il existe des mines de cuivre en beaucoup de localités ; mais il n'y a pour ce métal que deux centres importants de production, Atvidaberg et surtout Storakopparberg plus connu dans le monde métallurgique sous le nom de Fahlun. La production du cuivre s'est élevée en 1844 à 9.929 skipf. (13.502 q. m.). L'exportation s'est élevée à 8.488 skipf. (11.544 q. m.).

Les autres produits métallurgiques sont l'argent, le plomb, le cobalt, le soufre, le sulfate de fer, l'alun, le charbon de terre, etc. ; mais la valeur de tous ces produits est peu de chose par comparaison avec celle du fer et du cuivre. F. L-P.

NOTICE

SUR LE TERRAIN HOUILLER DE SINCEY (CÔTE-D'OR) (1);

Par M. GUILLEBOT DE NERVILLE, Ingénieur des mines.

MM. Élie de Beaumont et Dufrénoy ont décrit le terrain houiller de Sincey dans le premier volume de leur magnifique ouvrage sur la géologie de la France (2); ils ne lui ont consacré qu'une page, et cependant ils n'ont omis aucun des traits qui pouvaient servir à le caractériser et à le classer. L'époque où ils le marquaient sur leur carte (1836) est à peu près celle où M. de Nansouty, aidé d'un maître mineur allemand, venait d'en faire la découverte et de le mettre en exploitation; depuis, ce terrain est resté pendant sept années le siége de travaux de recherches, toujours assez restreints, qui n'ont réussi qu'à montrer son allure tourmentée et qu'on a fini par abandonner comme improductifs. L'étude que j'en vais faire et qu'après ce préambule on va trouver bien développée, n'aura donc qu'un but presque purement scientifique; mais parler ainsi de ce terrain et commencer par mettre à peu près à néant les espérances industrielles qu'on pourrait songer à fonder sur lui, c'est peut-être détruire dès l'abord l'intérêt que son nom seul inspirait en réveillant une idée de richesse. Préambule.

(1) Extraite de la description géologique de la Côte-d'Or.

(2) Explication de la carte géologique de la France, t. Ier, p. 682.

Situation de ce terrain.

C'est à l'extrémité de la pointe du massif primordial du Morvan, dans la partie où l'on commence à trouver à sa surface des plaques plus serrées d'arkose et de lias, et où son plateau va disparaître au N.-E. sous des contre-forts jurassiques et ne plus laisser voir de granite qu'au fond des plus proches vallons liasiques, qu'on rencontre ce terrain. C'est un lambeau arraché sans doute à un dépôt plus étendu et pincé presque verticalement comme un coin, ou même à la manière des filons, au milieu du terrain primitif. On ne voit que sa tranche; elle forme une bande longue et étroite, admirablement alignée, qu'on peut suivre sur une longueur de 24 kilomètres, depuis le pont de Bierre, près Ruffey (Côte-d'Or), jusqu'à Villers-les-Nonnains (Yonne). Sur tout ce parcours, cette bande n'est pas moins remarquable par l'uniformité de son épaisseur que par sa rectilignité : sauf un renflement peu étendu où elle atteint 4 à 500 mètres, elle conserve presque partout une largeur de 180 à 200 mètres (1). Elle est orientée à peu près E.-O.; cependant, quand on l'observe de près, on reconnaît qu'elle se compose réellement de deux lignes droites formant un léger coude un peu avant Sainte-Magnance, dans le bois de la Trèche : l'une, située presqu'en entier dans la Côte-d'Or, de 15.000 mètres, dirigée E. 3° S.; l'autre tout entière dans l'Yonne, de 9.000 mètres, dirigée E. 2° N. Elle n'est d'ailleurs interrompue que par le plateau de Thostes où elle disparaît pour une longueur de

Singularité de son gisement.

Étendue et direction de la bande rectiligne que forme son affleurement.

(1) La surface totale de la bande carbonifère de Sincey est de 487 hectares; la partie renfermée dans la Côte-d'Or, y compris 52 hectares recouverts par le lias de Thostes, est de 311 hectares; la partie située dans le département de l'Yonne est de 176 hectares.

2.500 mètres sous un plaque horizontale de lias qui recèle une riche mine de fer.

Cette situation anomale qu'on ne peut s'expliquer que par le fait d'une cassure du terrain primitif dans laquelle le terrain houiller, redressé sur sa tranche, aurait été pris et comme laminé entre deux massifs disjoints, a contribué à nous conserver ce lambeau et à le préserver d'une désagrégation à laquelle n'ont pu échapper, en raison de la nature friable des roches qui les constituaient, beaucoup de plaques du même terrain moins tourmentées mais plus exposées à l'action dénudante des eaux. Cette cassure est probablement antérieure au dépôt du *trias* dont on trouve non loin de là, autour de la ville de Sémur, des affleurements à très-peu près horizontaux; elle a ouvert une issue à une éruption de porphyre quartzifère qui s'est épanchée dans tous les joints qui s'offraient à elle, et qui s'est solidifiée en colonnes et en nappes à la séparation du terrain encaissant, à son *toit* et à son *mur*, pour me servir des expressions reçues. La nappe porphyrique du mur est la plus constante et la plus régulière; je l'ai suivie presque sans interruption sur toute la longueur de la bande carbonifère; la nappe du toit est sujette à plus de renflements et m'a paru présenter beaucoup moins de continuité.

Une éruption de porphyre a accompagné son redressement.

La *fig.* 1, Pl. II achèvera de fixer les idées sur la position de ce terrain; elle représente une coupe perpendiculaire à sa direction et passant par le village de Sincey qui lui donne son nom, mais elle peut s'appliquer presque sans modifications à toutes les coupes effectuées du nord au sud, d'un bout à l'autre de la bande carbonifère. Je suppose, comme on le voit, que les porphyres du toit et du mur se rejoignent sous le terrain houiller, comme les deux branches d'un tronc dé-

terminé lui-même par le joint de la brisure du terrain primitif; cette supposition ne doit pas s'éloigner de la réalité : elle prendra plus de certitude à mesure que s'avancera cette description. Les couches plongent au sud en masse et ne paraissent avoir nulle part de relèvement. Au reste, la position presque verticale de ce terrain, dans un pays très-découvert et coupé de nombreux ravins, en rend l'étude facile et fait disparaître beaucoup de chances d'erreur.

Son rôle orographique est à peu près nul.

Ce terrain ne joue aucun rôle dans l'orographie du pays; il n'est même pas marqué sur le sol primitif par une rainure constante : en beaucoup de points, sa tranche affleure exactement sans dépression sensible le plan du plateau de granite toujours un peu altéré et recouvert d'arène à la surface; le Serein qui dans son cours sinueux le coupe trois fois complétement et l'entame à quatre autres reprises, sur une longueur de 8 kilomètres, loin d'y ouvrir de préférence son lit, comme on l'aurait pu penser, l'épargne souvent pour mordre dans le granite et dans le porphyre qui l'enclavent, laissant de lui, parfaitement intacts, des promontoires et des presqu'îles qu'on s'attendrait à trouver démolis.

Détails sur le gneiss et le micaschiste du mur du terrain.

Le micachiste, dégénérant à chaque pas en gneiss, forme une bordure constante au mur de ce terrain tout le long de son affleurement dans la Côte-d'Or. Son épaisseur qu'on peut souvent mesurer exactement grâce aux entailles du Serein, varie de 200 à 600 mètres; il passe insensiblemement au granite à grain moyen avec lequel il est comme fondu, et dont il enclave des veines et des amas considérables; celui-ci passe plus insensiblement encore au granite porphyroïde à grands cristaux de feldspath orthose du plateau de Vieux-Château et Montberthaut. Ses feuillets, souvent contournés et froissés, sont toujours très-inclinés à l'horizon et plon-

gent tantôt au sud, tantôt au nord ; habituellement ils sont à grandes lames de mica blanc argentin, entrelaçant des plaques et des noyaux de quartz hyalin blanc laiteux ; tel est le micaschite du moulin de Villars qu'on peut prendre pour type et qui occupe la moitié de l'espace compris entre Villars et Thostes, produisant sur les bords du Serein les escarpements les plus pittoresques. D'autres fois il est à petits feuillets de mica bronzé et rouge lie-de-vin, très-foncé, presque sans interposition de grains de quartz, et constitue alors une roche tendre et friable qu'on peut voir au pont de Beauregard, sur la route qui va de ce village à Courcelles-les-Semur. Souvent enfin ses feuillets s'écartent ; leurs interstices s'injectent de feldspath orthose rosé, et l'on a un gneiss dont les caractères sont plus ou moins accentués, ou se rapprochent de plus en plus, au contraire, de ceux d'un granite schisteux.

Filons de pegmatite et de quartz inclus dans ce gneiss.

De nombreux filons de pegmatite pénètrent la masse du gneiss ; ce sont sûrement des injections contemporaines de l'éruption du granite qui d'un dépôt primitivement argileux et schisteux et d'origine sédimentaire ont fait la roche éminemment cristalline que nous voyons aujourd'hui. Ces filons n'ont en général que quelques décimètres d'épaisseur ; quelquefois ils coupent obliquement les feuillets du mica, mais plus généralement ils sont parallèles à leur direction, avec des branches latérales faiblement inclinées sur le tronc. Si on les suit avec un peu de persistance, on les voit presque toujours commencer et finir en biseau ; ainsi la plupart des fissures par lesquelles les injections se sont faites, se sont presque immédiatement fermées et ressoudées. Près de ces filons se trouvent souvent de simples nœuds de pegmatite autour desquels se contournent et se plient les feuillets de mica. Quelquefois,

Disposition rubanée de quelques-uns de ces filons.

le filon prend une structure rubanée; il s'y fait une séparation en trois zones : le quartz avec une tendance plus ou moins cristalline en occupe la partie médiale, et le feldspath orthose, d'un blanc légèrement rosé, est repoussé uniformément sur les bords et y forme deux bandes bien nettes et bien tranchées; parfois, enfin, l'axe du filon est marqué par une ligne de paillettes de mica orientées en tous sens. Cette disposition en ruban se fait remarquer jusque dans des filons qui n'ont que 3 à 4 centimètres d'épaisseur; dans les filons les plus minces, cependant, le feldspath disparaît avant le quartz qui seul alors subsiste; on serait ainsi conduit à considérer certain filons de quartz hyalin inclus dans ces gneiss et ces micaschistes comme une variété ou plutôt comme une dégénérescence des filons de pegmatite.

On peut voir de ces veines de pegmatite et de quartz dans la plupart des coupures que le Serein a faites au milieu du gneiss, principalement entre Villars et Courcelles-Frémois, et dans son affleurement sur le plateau de la Charmée; il n'est pas rare d'y trouver les minéraux habituels de la pegmatite, principalement des cristaux de tourmaline noire.

Du porphyre quartzifère intercalé au mur du terrain houiller.

Le porphyre quartzifère interposé entre le micaschiste et le mur du terrain houiller est, tout le long de l'affleurement, parfaitement caractérisé mais d'une épaisseur très-variable. Dans les points où il est le plus développé et où il atteint une puissance de 30 à 40 mètres, comme à Sainte-Magnance (Yonne), et dans la traversée de la nouvelle route de Sincey à Montberthault, il paraît avoir cristallisé à peu près en liberté et se présente à son état normal. Il est alors formé d'une pâte fine feldspathique tantôt compacte et à cassure vive et esquilleuse, tantôt terreuse et déjà en partie

kaolinisée, d'une couleur qui varie du rouge brique foncé, noire bleuâtre, par places, au blanc mat ou très-légèrement rosé, parsemée d'une infinité de grains de quartz vitreux gros tout au plus comme des pois, souvent amorphes, quelquefois cristallisés et bipyramidés, et de lamelles beaucoup moins nombreuses de feldspath orthose d'une couleur généralement plus pâle que celle de la pâte. Dans ces parties, il affecte une division en grosses boules séparées par des joints terreux blanchâtres.

Dans les points où ce porphyre se réduit à une nappe de quelques mètres d'épaisseur, il présente une texture un peu différente : c'est toujours la même pâte euritique variant du blanc mat au rouge brun violet, mais moins bien venue et plus confuse, avec les mêmes lamelles de feldspath orthose presque toutes altérées à la surface, et un grand nombre de grains de quartz vitreux, cette fois tous très-petits et ne dépassant pas généralement la grosseur d'une tête d'épingle. Il est alors comme étonné et pénétré dans toutes les directions d'une quantité de petits filets quartzeux capillaires comme on en voit dans tous les porphyres du pays, mais ici beaucoup plus nombreux. Enfin, il y montre une plus grande tendance à se décomposer, suite naturelle d'un refroidissement plus brusque et d'une cristallisation plus incomplète. On le trouve ainsi souvent complétement kaolisé sur 2 ou 3 mètres de profondeur dans le voisinage des affleurements; tellement qu'on a pu l'exploiter et en extraire par un triage facile une terre réfractaire blanchâtre de bonne qualité, assez semblable à celle bien connue du *Montet*. Cette terre a été utilement employée aux forges de la Maisonneuve (1).

En quelques points, ce porphyre, kaolinisé, peut fournir une bonne terre réfractaire.

(1) La terre réfractaire de Sincey sur laquelle il me paraît

Contact du porphyre et des terrains encaissants.

Quand ce porphyre est développé, il existe à son contact avec le terrain houiller une *roche de frottement* très-reconnaissable, sorte de conglomérat de grès et de porphyre, à fragments anguleux soudés par un ciment euritique presque toujours kaolinisé et ramené par la décomposition à l'état de l'argile des salebandes de filons; ce conglomérat est toujours très-peu épais (quelques décimètres, au plus) et se confond très-vite, du moins aux affleurements où je l'ai observé, avec le poudingue et le grès d'origine sédimentaire au détriment desquels il a été en partie formé. Quand l'intercalation du porphyre ne consiste qu'en une nappe peu épaisse, la roche de frottement est complétement absente ou représentée seulement par une mince salebande qu'il est même quelquefois difficile de distinguer. Il existe une salebande semblable au contact du schiste micacé ou du gneiss, mais elle est plus purement argileuse et tranche davantage avec le porphyre.

Si l'on côtoie le mur du terrain houiller jusqu'au-

---

utile d'insister, bien que les gîtes n'en soient plus utilisés aujourd'hui, s'exploitait principalement entre la Charmée et Sincey. Il était nécessaire pour en tirer parti, d'en séparer complétement les fragments de porphyre non décomposés et de la faire passer sous une meule pour écraser les grains de quartz qu'elle renfermait en grande quantité. En cet état, on la moulait en briques dont on pouvait construire en toute sûreté les autels et les parois intérieures des fours à réchauffer et à puddler. Rendue à l'usine de la Maisonneuve, elle revenait à 10f,50 le mètre, savoir: 2 francs d'extraction, 0f,50 d'indemnité au propriétaire du sol, et 8 francs de frais de transport.

On pourrait extraire une terre semblable sur la majeure partie de la lisière nord de la bande carbonifère; il ne faut pas la confondre avec une autre terre qu'on rencontre à peu près au milieu de la tranche du terrain houiller sur l'affleurement d'une couche de grès feldspathique en décomposion. Cette seconde terre ne vaut pas la première, elle est plus maigre et cependant moins réfractaire.

dessous de Ruffey, on ne perd de vue le porphyre que lorsque le terrain houiller lui-même disparaît sous le plateau liasique de Thostes. Au pont de Bierre, sur le chemin de Bierre à Ruffey, 4 à 500 mètres avant d'atteindre la grand'route de Semur à Saulieu, on voit ce terrain s'amincir très-rapidement et se terminer en un biseau où les couches de grès et de schistes sont fortement laminées et tordues, au milieu d'une masse de ce porphyre de plus de 100 mètres d'épaisseur qui n'est que la réunion en une espèce de fer de lance des nappes du toit et du mur. Là s'arrête le terrain houiller à l'est. Si l'on veut remonter son affleurement en suivant, cette fois, son toit, on y trouve pendant plus d'un kilomètre un porphyre identiquement semblable à celui qu'on a quitté au mur. Ce porphyre, toutefois, ne tarde pas à s'oblitérer : souvent il disparaît complétement ou au moins il est impossible d'en retrouver la trace sous les détritus du granite; quelquefois il dégénère en eurite rougeâtre sans cristaux de quartz ni de feldspath, poussant des rameaux dans le granite. D'autrefois il devient *granitoïde* : sa pâte prend une structure confuse, il s'y développe des paillettes de mica, et la roche semble se fondre insensiblement avec le granite du toit.

Ce porphyre contourne l'affleurement houiller à l'est.

Du porphyre quartzifère intercalé au toit du terrain.

L'un des points où ce porphyre redevient le mieux lui-même et où l'on peut de nouveau constater son identité avec celui du mur, est la sortie du bois de la Trêche, sur la route de Rouvray à Avallon, près du petit étang de Sainte-Magnance. En ce point, les deux nappes porphyriques sont très-épaisses et soudées au terrain primitif encaissant; elles réduisent la tranche du terrain houiller presqu'à 100 mètres et l'enchâssent tout à fait verticalement, mais elles ne l'interrompent pas; des deux côtés de la tranche, le porphyre a exactement les mêmes caractères minéralogiques et le même aspect :

Affleurement de Sainte-Magnance

preuve, encore, que dans la profondeur les deux nappes ont un jet commun. Il y est à son point de plus beau et de plus complet développement cristallin : les grains de quartz y sont éclatants et comme espacés uniformément ; la pâte feldspathique est d'un rouge clair avec petits cristaux allongés de feldspath orthose, et des nids fréquents d'une substance jaune verdâtre cireuse qu'on regarde comme une variété de *pinite*, mais qui n'est peut être qu'un hydrosilicate de magnésie et de fer mal cristallisé, ou un mica à l'état confus,

Les porphyres ne m'ont paru interrompre le terrain houiller, à l'ouest, qu'à Villers-les-Nonnains : je n'ai pas suivi ce terrain plus loin ; c'est ce point que je considère comme sa limite ouest. J'ai bien entendu dire qu'on en retrouvait des traces un peu plus bas au sud-ouest, près d'Auxon, mais je ne l'ai pu vérifier ; l'interruption de Villers-les-Nonnains ne serait alors qu'un rejet, mais ce fait aurait besoin d'être confirmé.

Massif primitif du toit.

Je n'ai qu'un mot à dire du massif primitif du toit : il est généralement composé d'un granite rose, à une seule variété de feldspath (l'orthose), associé comme celui du mur à une bande de gneiss, qu'on rencontre entre Thostes et Chamont, à 1.000 mètres environ au sud de l'affleurement houiller, et qui se termine en pointe un peu avant Sincey. Si l'on veut noter une différence de détail entre ce granite et celui du mur, on peut remarquer qu'il a moins d'uniformité et de ténuité de grain, et que, dans le voisinage de la bande carbonifère, il passe souvent sur une assez grande largeur à une pegmatite très-quartzeuse à gros grains. Passé Saint-Magnance, du reste, et en s'avançant vers Villers-les-Nonnains, cette différence s'efface et l'identité entre les granites du toit et du mur devient beaucoup plus évidente.

Le terrain de Sincey en lui-même est bien incontestablement du terrain houiller proprement dit, comme le prouvent surabondamment et sa constitution que je vais faire connaître, et la nature des fossiles végétaux qu'on y rencontre en grand nombre ; mais le combustible qu'il renferme a tous les caractères de l'anthracite. **Du terrain houiller lui-même.**

Ce terrain est composé de poudingues, de grès et d'argiles schisteuses : **Sa composition générale.**

Le poudingue n'occupe pas uniquement et constamment la base du terrain ; il y forme des bancs nombreux, répandus un peu dans toute son épaisseur. Souvent, la couche la plus voisine du mur, celle qu'on peut regarder comme le premier lit du dépôt quand la tranche se présente tout à fait verticale, est formée de poudingue ; mais, quelquefois aussi, et notamment aux recherches de Sincey, endroit où le lambeau a le plus de puissance, la première assise est un grès à grains fins qui n'est séparé du gneiss et du micaschiste que par la nappe de phorphyre constante au mur, ainsi que je l'ai dit. **Du poudingue.**

Ce poudingue est presque toujours rougeâtre. Quelle que soit sa place dans le terrain, il est généralement composé de galets d'un petit volume, atteignant rarement la grosseur de la tête, soudés par un ciment de grès houiller bréchiforme extrêmement solide, et par une pâte siliceuse tenant parfois de la nature du jaspe.

Les galets sont roulés également sur toutes les faces et non pas aplatis ; ils témoignent d'une action de transport comme n'en ont pu produire que des cours d'eau torrentiels ; cependant, suivant la remarque générale qu'en ont faite MM. Élie de Beaumont et Dufrénoy et dont ils ont démontré l'application à tous les bassins houillers de l'intérieur de la France, ces galets proviennent tous de roches du pays environnant et ne

semblent avoir été apportés que d'une faible distance. Les galets de granite sont les moins abondants ; on y trouve cependant tous les types de granite de la contrée, principalement le granite rose à un seul feldspath (l'orthose) ; moins fréquemment, les granites à oligoklase, qui, plus sujets à s'altérer et à se désagréger, ont dû plutôt servir à donner les éléments du ciment. On y rencontre aussi des galets de gneiss, de pegmatite, et beaucoup de galets de quartz blanc hyalin laiteux formés aux dépens des filons et des masses quartzeuses du terrain primitif. Ce qui domine par-dessus tout, ce qui forme vraiment la masse du poudingue, c'est le porphyre quartzifère et l'eurite. Ce porphyre est identique à celui qui forme de si grandes masses associées au terrain de transition dans le Morvan ; c'est une pâte feldspathique compacte, variant du blanc légèrement rosé au rouge brique le plus foncé, parsemée d'une infinité de grains de quartz vitreux amorphes ou bipyramidés, variant de la grosseur d'une petite tête d'épingle à celle d'un pois, et de lamelles de feldspath, dont la couleur se détache à peine du fond de la pâte. Minéralogiquement, ce porphyre, et j'ai eu peine à attendre jusqu'ici pour le dire, ne présente aucune différence avec celui qu'on trouve intercalé en nappes au mur et au toit du terrain houiller; cette identité sautait aux yeux ; je n'ai pas voulu cependant l'admettre sans la soumettre à une vérification : j'ai adressé à M. Delesse de nombreux échantillons des trois porphyres (porphyre du Morvan pris en place, galets porphyriques du terrain de Sincey, porphyre intercalé en nappes au mur du même terrain) et il n'a point hésité à reconnaître leur parfaite ressemblance d'aspect et de composition. Ainsi, le même porphyre, minéralogiquement parlant, s'est fait jour en Bourgogne à deux époques

Les galets porphyriques y sont surtout dominants.

Ce porphyre est identique à celui du Morvan, et en tout semblable à celui qui, depuis, s'est épanché au mur et au toit du terrain.

distinctes qui comprennent entre elles la période de dépôt du terrain houiller : la première éruption a traversé et modifié le terrain de transition et a fourni au terrain houiller de Sincey la majeure partie de ses éléments ; la seconde éruption est survenue au moment du redressement de ce terrain, avant le dépôt du *trias*. A en juger même par l'abondance de ces galets porphyriques, et comme il n'est pas probable que tous aient pu venir de la région située au delà de Saulieu, il est à croire que la première éruption avait envahi une notable partie de l'espace que recouvrent aujourd'hui les terrains jurassiques au nord et au nord-est de la pointe du Morvan.

Passer en revue les variétés que présentent ces galets et décrire les altérations qu'ils ont pu subir avant ou depuis leur incorporation dans le terrain, serait descendre à des détails sans intérêt ; je ne m'arrêterai qu'à leurs principaux accidents. Beaucoup d'entre eux portent les traces d'une énorme pression exercée sur le terrain par les parois de la faille granitique dans laquelle il s'est trouvé saisi et encastré : il est fréquent d'en rencontrer qui, malgré leur excessive dureté, ont littéralement pénétré les uns dans les autres ; un grand nombre qui, sans doute, se trouvaient en porte-à-faux au milieu des bancs, ont été brisés ou même broyés sur place, puis ressoudés, soit par un ciment siliceux qu'on prendrait souvent pour de la pâte de porphyre, soit par le ciment de grès lui-même, en quelque sorte redevenu plastique, et que la pression a fait pénétrer jusque dans les fissures les plus étroites des galets brisés.

Nombreuses traces d'écrasement dans ces bancs de poudingue.

J'ai dit que le ciment du poudingue était un grès houiller bréchiforme ; il est formé de détritus de granite, de porphyre et de schistes de transition. Sa cou-

leur est généralement rougeâtre, quelquefois verte. Aux affleurements, il perd habituellement de sa cohésion par suite de l'altération des cristaux de feldspath et des fragments de porphyre dont il est pétri ; mais dans la profondeur, il est toujours dur et solide, et sa cassure présente souvent le même tranchant et la même nature esquilleuse que celle des galets de porphyre ; en quelques points même, il devient jaspoïde, et l'on serait tenté d'y voir des indices, sinon d'une fusion, au moins d'un ramollissement comme en aurait pu produire l'action d'une excessive chaleur ; mais cette texture n'est que le résultat d'une imprégnation de silice commune à beaucoup de roches de ce terrain. Au reste, les bancs de poudingue dont le ciment est le plus compacte et le plus solide, et ceux dont les galets portent le plus de traces de l'écrasement produit par la pression des parois granitiques, ne sont pas seulement les plus rapprochés de ces parois, mais se trouvent aussi au milieu du lambeau.

États divers du ciment du poudingue.

Les grès sont la roche dominante du terrain : ils alternent dans toute son épaisseur avec les bancs de poudingue et de schistes argileux, mais ils sont principalement développés dans sa partie moyenne et inférieure. Formés d'éléments plus ou moins roulés et atténués du granite et du porphyre, ils ont généralement la plus grande analogie d'aspect avec le type habituel du grès houiller tel qu'on le connaît dans tous les bassins de l'intérieur de la France : à grains quartzeux, de grosseur à peu près uniforme dans un même banc, soudés par un ciment argileux grisâtre, avec nids charbonneux assez fréquents ; ils sont seulement parfois un peu rougeâtres, surtout aux affleurements, rappelant ainsi le porphyre dont ils dérivent en partie, et certains bancs ont quelque chose de plus *soudé*, je dirais presque

Du grès.

De l'apparence modifiée qu'il présente en quelques points.

de *vitrifié*, qu'ils doivent à la présence d'un second ciment siliceux qui en imprégne la masse.

L'un des bancs les plus singuliers de ce grès se voit au contact même de la nappe de porphyre du mur du terrain, au bas du hameau de la Charmée, à la naissance d'un ravin qui descend du hameau jusqu'au fond du vallon de Sincey. Il a 18 à 20 mètres d'épaisseur; dans quelques parties, il est kaolinisé et couvert d'éboulis provenant de l'altération de sa surface, mais en beaucoup d'endroits sa tranche est à nu et permet de l'étudier en détail. Il est blanc grisâtre, à grains fins quartzeux et feldspathiques solidement agrégés, zoné ou plutôt rubané de veines de couleur plus foncée et de texture compacte et cornée disposées dans le sens de la stratification. Ces rubans, dans lesquels on a sans doute déjà reconnu du jaspe, varient de quelques millimètres à 1 ou 2 décimètres d'épaisseur; leur espacement est souvent de moins de 1 centimètre, et quelquefois ils sont tellement rapprochés qu'on peut dire que sur plusieurs mètres ils envahissent tout le grès. La première fois que j'ai observé ce grès, j'ai cru y voir le résultat d'une sorte de métamorphisme causé par le contact du porphyre; j'ai pensé que sous l'action d'une forte chaleur il s'y était fait une sorte de départ entre les molécules telles que l'eau les avait déposées : qu'il s'y était créé des bandes fusibles qui avaient fondu, et des bandes infusibles qui étaient restées à l'état de grès; mais plus tard, revenant à des idées plus saines, et tenant mieux compte de la nature essentiellement siliceuse des bandes compactes, j'ai reconnu qu'on ne devait les attribuer qu'à la concentration par voie humide d'une dissolution de silice calcédonieuse probablement contemporaine du dépôt arénacé du grès; il m'a paru même que cette silice avait dû conserver quelque temps

Certains bancs de ce grès dégénèrent en un véritable jaspe.

dans la roche, après sa concentration, son état liquide ou au moins gélatineux, car elle a également rempli une quantité de petites fissures de retrait transversales à la direction commune des rubans, qui n'ont pu se produire que lorsque le grès avait acquis déjà une assez grande solidité. Cette explication a pris pour moi plus de force encore quand j'ai mieux connu l'ensemble du terrain et que j'ai constaté que le porphyre quartzifère n'y avait jamais modifié d'une manière sensible les roches au contact desquelles il s'était épanché (1).

Autres variétés de grès.

En d'autres grès plus grossiers et situés indifféremment à diverses hauteurs du terrain, une sorte de suc siliceux semblable, si je puis parler ainsi, est resté à l'état de diffusion dans la roche et n'a fait qu'en consolider le ciment d'une manière générale sans devenir nulle part visible. Dans quelques bancs enfin où cette silice existait encore, mais moins abondante, elle s'est concentrée sur des débris végétaux et a remplacé, molécule à molécule, leur substance à mesure qu'elle se décomposait. C'est ainsi qu'on trouve dans ces grès de belles tiges silicifiées de palmiers et de conifères qui rappellent celles du terrain houiller d'Autun, mais qui

---

(1) Ce porphyre n'agissait sans doute, au moment de son éruption, qu'en trop faible masse pour pouvoir laisser une trace de son action sur les roches du terrain houiller. Loin d'avoir un excédant de chaleur à leur communiquer, il n'a pu lui-même, souvent, arriver au jour et s'épancher qu'à l'état d'eurite, c'est-à-dire privé déjà d'une notable partie de sa silice, faute, sans doute, d'avoir pu la tenir en fusion.

Si les porphyres du Morvan, identiques à celui-ci pour la composion, mais d'une éruption antérieure, ont si profondément modifié le terrain de transition auquel ils sont associés, c'est probablement parce qu'ils se sont épanchés en masses beaucoup plus considérables et qu'ils ont pu, par conséquent, donner passage à un flux de chaleur incomparablement plus grand.

sont proportionnellement beaucoup moins nombreuses; elles ne sont généralement qu'à l'état de fragments dont le volume a été sans doute limité par la quantité de silice disponible au moment de la silicification, et parfois il est arrivé que dans un même fragment de tige enchâssé de toutes parts dans le grès, une partie a été transformée en houille et l'autre partie silicifiée.

Végétaux silicifiés inclus dans ces grès.

On trouve aussi dans ce terrain des grès schisteux d'un grain extrêmement fin; très-propres par conséquent à conserver l'empreinte des végétaux pris entre leurs feuillets : ils renferment abondamment des tiges de calamites, des lépidodendrons et de très-nombreuses feuilles de fougères; ces empreintes sont souvent charbonneuses; quelques-unes ont conservé la matière même de la feuille simplement desséchée et à peine altérée.

Du schiste argileux.

Les schistes argileux, abondants surtout à mesure qu'on se rapproche du toit du terrain, ne présentent point de différence avec ceux des autres bassins houillers. Ils sont en général d'une pâte fine et homogène, colorée en noir mat par du charbon disséminé d'une manière égale dans toute leur masse, ne devenant grisâtres et lie-de-vin que par altération dans le voisinage des affleurements. On y rencontre très-fréquemment de ces surfaces de glissement striées et luisantes auxquelles les ouvriers mineurs donnent le nom de *miroir*; elles ont vraisemblablement été produites au moment où ce terrain a été redressé et froissé au milieu du terrain primitif. Les empreintes végétales y sont aussi très-communes; j'en parlerai bientôt avec détail.

Un accident particulier de ce schiste est de renfermer de nombreuses amandes et des veines assez épaisses de quartz lydien placées dans le sens de la stratification : l'exploitation en a même fait découvrir des bancs qui

Veines et amandes de quartz lydien prenant quelquefois l'importance d'un banc, enclavées dans les schistes.

atteignaient jusqu'à 1 mètre et 1m,40 d'épaisseur moyenne, et qui paraissaient se prolonger au loin avec une certaine continuité. Cette lydienne n'est évidemment qu'une forme nouvelle de cette concentration siliceuse sur laquelle j'ai déjà tant insisté en parlant du grès, qu'un résultat du départ et de la réunion en une masse concrète d'une dissolution siliceuse qui, à l'époque du dépôt du terrain, imprégnait la matière argileuse et terreuse du schiste, absolument comme à d'autres niveaux elle imprégnait l'arène sableuse et feldspathique du grès. Elle est généralement d'un beau noir veiné de minces filets blancs, et présente au plus haut degré toutes les propriétés du quartz compacte; quelques parties sont rubanées de bandes claires ou d'un brun marron qui ne sont pas toujours aussi purement siliceuses et doivent tenir en mélange un peu de la substance argileuse du schiste, car elles ont moins de dureté que le reste et se laissent rayer par une pointe d'acier; mais habituellement la matière siliceuse en se séparant n'a conservé du schiste que le charbon à l'état extrêmement divisé qui le colorait, et quelquefois sa structure feuilletée.

Autres accidents du schiste.

Quelques bancs de schistes, un surtout qui occupe à peu près le milieu de la bande carbonifère, sont intimement pénétrés de pyrite de fer et s'effleurissent dans les points où ils viennent au jour.

Quelques-uns enfin contiennent des rognons de fer carbonaté lithoïde, car il m'a été possible d'en ramasser sur les affleurements, mais toujours rares et peu développés.

Listes des végétaux fossiles trouvés dans ce terrain.

Quant aux empreintes végétales qui vont nous mener naturellement à parler du charbon, elles présentent dans le terrain de Sincey, une grande variété : ce sont d'abord les *Sigillaria*, genre éminemment caractéris-

tique du terrain houiller, dont on trouve de nombreux débris portant souvent encore leur écorce charbonneuse, et dont il n'a été possible de déterminer exactement que deux espèces : *Sigillaria lata* et *Sigillaria elongata* (Brongn.) ; de très-nombreuses fougères paraissant se rapporter aux genres et espèces suivantes : *Pecopteris Serlii* (Brongn.), *Pecopteris cyathea* (*Id.*), *Pecopteris arborescens* (*Id.*), *Pecopteris* voisin du *Miltoni* (Brongn.), *Pecopteris* (espèces diverses indéterminables) ; *Nevropteris angustifolia* (Brongn.) ; *Sphenopteris* voisin du *Vignalii* (Brongn.) ; des Astérophyllées, entre autres l'*Asterophyllites polyphylla* (Brongn.) ; l'*Annularia fertilis* (Brongn.) ; des tiges de Calamites également abondantes dans le schiste et dans le grès : *Calamites cannæformis* (Brongn.), *Calamites elegans* (Brongn.), *Calamites* (espèces indéterminables) ; des troncs et des feuilles de palmiers, communes aussi au grès et aux schistes : *Palmacites striatus* (Brongn.), *Palmacites* indéterminable ; des débris de *Lépidodendrons* ; des tiges et des rameaux de *Conifères* plus communs dans le grès et souvent silicifiés.

Du combustible.

La richesse en combustible que semblerait présager cette abondance en empreintes végétales (je parle ici au point de vue des idées généralement reçues), fait entièrement défaut. Les recherches, il est vrai, n'ont point été complétement décisives et il eût été possible de les mieux conduire ; mais enfin elles ont principalement porté, comme elles le devaient, sur la partie du terrain qui était le moins resserrée dans son étau de granite et qui paraissait devoir offrir le plus de chances de succès. Si l'on ne veut omettre aucune des moindres veines de charbon qu'on y ait rencontrées, on peut en compter jusqu'à six, mais il n'y en avait réellement que

deux qui fussent exploitables : l'une, d'une épaisseur moyenne de 1m,20, l'autre de 1 mètre ; encore a-t-il été constaté que le charbon n'y formait que des lentilles entrelacées de schistes qu'on craignait à chaque instant de voir disparaître, et que ces veines elles-mêmes se terminaient en pointe et finissaient par se perdre dans l'allongement.

Il a tous les caractères de l'anthracite. Ce charbon s'est constamment présenté avec les caractères de l'anthracite : il est d'un noir légèrement métalloïde ; sa structure est tourmentée, et le moindre choc le divise en écailles et en fragments lenticulaires à surfaces lisses. Il n'a qu'une faible cohésion et s'écrase facilement entre les doigts en y laissant une empreinte noire. Il brûle sans se boursoufler, sans donner ni flamme ni odeur sensible, et habituellement sans décrépiter ; la calcination en vase clos ne change pas sa forme et ne lui fait perdre que 8,6 p. 100 de son poids.

Son analyse. J'ai fait connaître en 1841 son analyse (1) : j'ai expérimenté plusieurs échantillons provenant des deux veines principales, et suis arrivé à des résultats dont les écarts n'ont jamais excédé quelques centièmes ; en voici la moyenne :

Charbon.	0,826
Cendres.	0,088
Matières volatiles. . .	0,086
	1,000

L'épreuve de son pouvoir calorifique a été faite par la réduction de la litharge : une prise d'essai d'un gramme a réduit 28g,52 de plomb, d'où j'ai conclu que son pouvoir calorifique était représenté par la fraction 0,84, celui du carbone pur étant pris pour unité.

(1) *Annales des mines*, 4e série, t. I, p. 541.

Les cendres étaient argileuses, sans mélange de calcaire, et d'une couleur légèrement blonde qui n'accusait que des traces de peroxyde de fer.

La pression et l'espèce de trituration exercées par les parois du gîte au moment de son relèvement, nécessairement accompagnées d'une certaine production de chaleur, ont pu contribuer à donner à ce combustible cette nature d'anthracite et cette structure écailleuse en favorisant le dégagement de la matière bitumineuse qu'il pouvait renfermer, et en faisant subir à sa masse le froissement général dont elle porte la trace; mais il est à présumer qu'indépendamment des causes qui sont venues modifier sa nature depuis son dépôt, et par l'effet seul de son gisement au milieu de la région des poudingues, dans un terrain houiller qui paraît appartenir à la base de la formation, ce charbon dans son état premier, ne pouvait être que sec, peu bitumineux, et d'une essence voisine de celle de l'anthracite.

Comment sa nature première a pu être modifiée.

Pendant les sept années qu'ont duré les travaux de recherches, on a exploité et livré au commerce une quantité totale d'anthracite d'environ 55 à 60,000 quintaux métriques. Son prix moyen était d'un franc le quintal métrique (0f,80 l'hectolitre); elle n'avait d'autre usage que d'alimenter l'économie domestique et la chaufournerie; le rayon de sa vente ne s'étendait pas au delà de Vassy près Avallon; si les recherches en eussent fait découvrir des veines plus épaisses et plus suivies, sa pureté et son pouvoir calorifique l'auraient certainement rendue précieuse à employer dans quelques opérations métallurgiques; son exploitation s'est arrêtée au moment où l'on songeait à l'essayer dans les hauts-fourneaux du pays de Semur. La fabrique de ciment de Vassy est l'usine qui en a le plus consommé; dès la seconde année d'emploi, on lui donnait la préférence sur les

Quantité de ce combustible extraite, jusqu'ici, des travaux de recherches.

Usages auxquels il a été employé.

houilles d'Épinac et Blanzy ; elle avait effetivement l'avantage, avec un prix moius élevé, de ne point encombrer les fours, de donner beaucoup de chaleur, et de ne point altérer sensiblement les proportions du ciment en raison du peu de cendres qu'elle renfermait.

Coupe générale et détaillée du terrain prise dans la partie où il paraît le plus complet.

Une coupe générale du terrain, prise à peu près dans sa partie la plus large et partant la plus complète, va montrer comment alternent ses bancs, et comment se coordonnent entre elles les roches de nature variée que je viens de décrire. Pour établir cette coupe, je me suis servi, avant tout, de ce que j'ai pu avoir de précis sur les renseignements fournis par les travaux de recherches entrepris entre la Charmée et Sincey ; mais comme ces travaux n'ont guère occupé que le milieu de la bande carbonifère et ont laissé entre eux beaucoup de lacunes, j'ai dû souvent recourir aux affleurements et en faire une étude spéciale : j'ai profité de ce ravin, qui descend de la Charmée perpendiculairement à la direction des couches, à demi-distance environ des deux exploitations principales ; j'ai relié ses indications à celles de deux autres ravines qu'on rencontre en marchant vers la roche du *Taureau-Danse ;* dans les points douteux, je me suis aidé de quelques tranchées qu'un maître mineur (1) du pays a fait ouvrir dans le seul but de m'être utile ; ce n'est qu'en arrivant au toit du terrain, dans les 50 à 60 derniers mètres, que l'épaisseur des éboulis et de la terre végétale ne m'a plus permis de songer à voir la tranche des couches, et a com-

(1) M. Jean-Marie Gueux, maître mineur à Thostes, chargé, longtemps, d'une partie des recherches de Sincey. J'ai souvent usé de son concours intelligent et lui ai dû de nombreuses et intéressantes communications ; sans son aide il m'eût été bien difficile sinon impossible de donner une coupe générale du bassin de Sincey.

mencé à laisser planer de l'incertitude sur les résultats de mon exploration.

Voici les détails de cette coupe : elle se dirige à peu près du nord au sud ; au point de départ, les couches sont verticales ou même légèrement renversées de manière à plonger, sur 15 à 20 mètres de profondeur, de quelques degrés au nord ; un peu plus loin, leur inclinaison se règle à 78° environ au sud.

	mètres.
Gneiss du mur, épaisseur indéfinie.	00,00
Porphyre quartzifère bien déterminé, en nappe de 4 à 5 mètres d'épaisseur.	
Grès fin quartzeux et feldspathique (décrit plus haut avec détail) rubané de parties siliceuses compactes, jaspoïdes ; présentant çà et là quelques strates à grain plus grossier bréchiforme, faisant pressentir le poudingue.	20,00
Grès schisteux gris.	2,00
Schiste argileux, de couleur cendrée et lie-de-vin, avec une veine de quartz lydien de 0m10 d'un beau noir à filets blancs.	2,00
Grès rougeâtre, à grain grossier, bréchiforme, solidement agrégé, avec poudingue à galets presque tous porphyriques.	7,00
Banc de quartz lydien veiné de noir, de brun et de gris, à structure rubanée et contournée ; avec feuillets de schiste argileux à pâte fine au contact du grès. . . .	1,00
Grès rougeâtre semblable au précédent mais plus fin, plus régulier et moins solidement agrégé.	4,00
Schiste argileux noir feuilleté, à tissu serré, avec empreintes végétales : *sigillaria*, etc.	1,00
Grès rougeâtre à grain grossier bréchiforme avec poudingue à galets principalement porphyriques et euritiques.	4,00
Grès schisteux micacé, avec nombreuses empreintes de calamites ; alternant en couches minces avec des bancs de grès grisâtre à grain moyen très-régulier solidement agrégé, renfermant des nids charbonneux, de fréquentes stries de glissement argileuses et noirâtres, et des empreintes indéterminables.	12,00
A reporter. . . .	53,00

	mètres.
Report.	53,00
Schiste argileux noir avec quelques rognons et veinules d'anthracite.	1,00
Grès noirâtre à grain moyen bien régulier, très-solide.	1,00
Première veine d'anthracite de 0m,50 environ d'épaisseur, enclavée au milieu d'un banc de schiste noir, explorée en divers points de la surface du sol, dans les bois de la Charmée.	1,00
Grès et poudingue à galets variés.	2,00
Schistes lie-de-vin avec empreintes de *sigillaria* et de fougères, alternant en bancs à peu près égaux avec des grès solides à grains fins et moyens renfermant eux-mêmes des tiges de calamites et des troncs de palmiers dont l'écorce est transformée en anthracite. . .	25,00
Grès verdâtre bréchiforme, très-solide, avec poudingue rougeâtre à galets variés et à ciment très-dur, en gros bancs.	11,00
Schistes noirs avec veines et amas lenticulaires de quartz lydien, alternant en banc de 1 à 2 mètres avec du grès houiller gris régulier, à empreintes végétales charbonneuses.	20,00
Deuxième veine d'anthracite explorée dans la profondeur aux travaux de Sincey et de la Charmée, et reconnue en outre à la surface par quelques recherches voisines de Sincey.	1,20
Grès blanc et gris à grain assez fin alternant en amas lenticulaires avec quelques lentilles de schistes argileux cendrés et lie-de-vin.	11,00
Grès schisteux jaunâtre à feuillets minces, alternant avec quelques bancs de schistes argileux noirs, à empreintes végétales, tiges et feuilles de pécoptéris, etc.	12,00
Troisième veine d'anthracite reconnue dans la profondeur à Sincey et à la Charmée, explorée aussi aux affleurements.	0,30
Grès houiller gris, solide, et poudingue rougeâtre. .	4,00
Alternances de grès plus ou moins grossiers, toujours solides et souvent bréchiformes, avec des lits de schistes noirs et lie-de-vin.	25,00
Poudingue à galets principalement porphyriques, en	
A reporter. . . .	168.50

	mètres.
Report.	168.50
bancs de 1 à 2 mètres d'épaisseur, séparés par des bancs de grès grossier à peu près égaux.	10,00
Schistes argileux noirs avec lentilles de quartz lydien qui atteignent en quelques points plus d'un mètre de puissance. Nombreuses empreintes de tiges et de feuilles de *pécoptéris*.	6,00
Alternances de grès houiller gris, à grain plus ou moins grossier, et de schistes argileux en lits peu épais renfermant quelques boules d'anthracite.	10,00
Schistes argileux noirs, pyriteux en quelques bancs, alternant avec des barres de grès schisteux à grains fins.	24,00
Grès dur et poudingue à galets porphyriques qui ont accidentellement jusqu'à 0^m,40 de diamètre.	3,00
Quatrième veine d'anthracite reconnue dans les travaux souterrains de Sincey, par une galerie à travers bancs, à 105 mètres de la deuxième veine. Exploitée sur une certaine étendue dans ces travaux, et attaquée en outre, aux affleurements, en plusieurs points des bois de Sincey.	1,00
Grès schisteux jaunâtre, alternant avec quelques minces lits de schistes à empreintes de fougères.	6,00
Alternances de bancs de grès gris, grossier, très-dur, et de bancs de poudingue rougeâtre qui ont jusqu'à 3 mètres d'épaisseur et dont les galets sont généralement plus gros que ceux des bancs précédents.	21,00
Schistes argileux noirs en bancs de 3 à 4 mètres, renfermant quelques boules d'anthracite, alternant avec des bancs un peu moins épais de grès tantôt schisteux et minces, tantôt à grains plus grossiers, solidement agrégés.	34,00
Grès houiller gris bien régulier avec quelques minces lits de schistes argileux lie-de-vin et deux ou trois bancs de poudingue d'un à deux mètres d'épaisseur.	16,00
Schistes argileux noirs feuilletés avec nombreuses empreintes de fougères.	10,00
Cinquième veine d'anthracite ayant une certaine régularité, quoique très-peu épaisse.	0,15
Schistes argileux noirs avec quelques minces barres de grès fin schisteux.	10,20
A reporter. . . .	329,85

	mètres.
Report.	329,85
Sixième veine d'anthracite semblable à la précédente.	0,15
Schistes argileux noirs alternant avec quelques barres de grès houiller.	20,00
Terrain houiller trop recouvert d'éboulis granitiques pour pouvoir être déterminé avec quelque sûreté, mais paraissant principalement formé de grès à grains fins et moyens alternant avec des bancs de schistes argileux.	60,00
Épaisseur totale.	400,00

Le toit du terrain est formé d'eurite rouge et de pegmatite en voie de décomposition.

Les recherches qui ont le mieux fait connaître cette partie du terrain ont eu pour siége l'origine du petit vallon compris entre les bois de Sincey et de la Charmée ; M. de Nansouty les a commencées en 1835 ; M. W. de Perrin les a prises en 1836 et continuées jusqu'à la fin de 1840. Les *fig.* 2 et 3, Pl. II, montrent leur disposition en plan et en coupe.

Travaux de recherches de Sincey.

Le puits n° 1, profond de 63 mètres, a été foncé en partie dans le toit de la deuxième veine de la coupe générale, en partie dans cette veine elle-même qui se présentait en ce point avec un plongement de 78 à 80° au sud, un peu ouest. La couche était enclavée entre deux bancs de grès à grain serré et à surface unie et miroitante portant de nombreuses traces de glissement ; son épaisseur moyenne était de 1^{m},20, mais elle avait des renflements qui allaient quelquefois jusqu'à 4 ou 5 mètres. L'anthracite n'y formait que des lentilles entrelacées de schiste argileux ; mais dans toute la partie explorée, c'était le charbon qui dominait. On n'a poussé les travaux dans cette couche qu'à 135 mètres environ vers l'est et à 30 à 40 mètres vers l'ouest, parce qu'on ne possédait pas une plus grande étendue de terrain à

Résultats auxquels ils ont conduit.

la surface ; dans tout cet espace, on a pris, en s'élevant sur des remblais, et jusqu'aux racines de l'herbe du pré, tout le charbon qu'on a rencontré.

Le puits n° 2 (puits du Bois) a été foncé à 120 mètres environ, au sud-ouest du précédent, dans des schistes à rognons d'anthracite qu'au premier abord on a pris pour une veine de combustible. On ne l'a poussé également qu'à une profondeur de 62 à 63 mètres, et de son pied, on a dirigé au sud une galerie à travers bancs un peu sinueuse, qui, après une cinquantaire de mètres, a rencontré la quatrième veine du bassin.

Cette couche, comprise entre un mur et un toit de schiste, avait plus de puissance qu'on ne lui en trouve généralement dans ses prolongements près de la surface du sol; on l'a suivie en direction sur la même longueur que la couche rencontrée par le puits n° 1, et on y a pratiqué, suivant l'inclinaison, trois larges cheminées de 30 à 40 mètres de hauteur ; elle a presque toujours conservé 2 mètres au moins d'épaisseur, et, quelquefois, elle a atteint jusqu'à 5 mètres ; mais le charbon ne la remplissait pas, tant s'en faut, en entier, et sa masse éprouvait de fréquents et grands rétrécissements par l'intercalation de noyaux et de lentilles d'un grès rougeâtre à grains grossiers fortement agrégés. L'anthracite y était d'un noir plus métalloïde et d'une structure plus écailleuse encore que dans la couche attaquée par le puits n° 1 ; elle était toujours d'une grande pureté et brûlait sans flamme ; on ne pouvait regretter que de voir à cette couche une allure si incertaine et de pressentir en elle, à chaque pas, le moment où le grès l'envahirait en entier.

Du pied du puits n° 1, on a poussé à la rencontre de cette veine une galerie horizontale à travers bancs, perpendiculaire à sa direction, qui l'a atteinte à une

distance de 105 mètres; cette galerie, l'ouvrage principal de toutes les recherches, a été poursuivie en ligne droite à 100 mètres plus loin environ, et elle a fait reconnaître les petites veines nos 5 et 6; il est malheureux qu'elle n'ait pas été commencée à une plus grande profondeur et surtout qu'on n'ait pas réuni assez de forces pour la pousser également au mur et au toit et lui faire traverser la totalité du terrain. A 23 mètres du pied du puits, elle a rencontré une couche d'anthracite de 0m,30 d'épaisseur (troisième veine du bassin) avec un mur de schiste argileux et un toit de grès. A 40 ou 50 mètres plus loin, elle a coupé un banc de lydienne de 1m,30 à 1m,40 d'épaisseur enclavé dans le schiste, et, avant d'atteindre la quatrième veine d'anthracite, une masse de schiste pyriteux qu'avait aussi traversée la galerie venant du puits du Bois et qui paraît très-constante dans toute la bande carbonifère. Les bancs de poudingue fréquents que rencontrait cette galerie rendaient son percement très-difficile; il semblait que ces bancs devenaient de plus en plus durs et plus solides à mesure que la galerie s'avançait au sud-ouest.

Travaux de recherches de la Charmée.

A 800 ou 1.000 mètres à l'est de ces recherches, on trouve les restes d'une seconde exploitation que madame de Candras avait fait ouvrir à peu près à la même époque et qui n'a été fermée qu'au mois de juin 1842. Les travaux (*fig.* 4) consistaient en un puits de 60 mètres et en une galerie à travers bancs de 63 mètres de longueur, partant du fond de ce puits et s'avançant au sud perpendiculairement à la direction des couches. Cette galerie a rencontré à 12 mètres du puits une petite couche d'anthracite de 0m,25 à 0m,30 d'épaisseur, intercalée dans le grès, et à 18 mètres plus loin, entre du schiste et du grès, une seconde couche d'un mètre de puissance moyenne, dans laquelle l'ex-

ploitation a été poursuivie d'étages en étages jusqu'au jour sur une étendue de 250 mètres à l'ouest et de 190 mètres à l'est. L'anthracite de cette couche, presque toujours séparée du toit et du mur par une surface lisse et polie, était encore disposée en lentilles de dimensions variables qui se perdaient dans le schiste. Quelquefois on avançait de 15, 20 et même 30 mètres sans sortir du charbon, puis on traversait une lentille de schiste qui occupait toute l'épaisseur de la couche sur une longueur de 8 à 10 mètres. Ces alternatives d'anthracite et de schistes se soutenaient avec assez de régularité dans les travaux de l'ouest du puits et laissaient l'avantage au charbon; mais à l'est, après une centaine de mètres, les amas d'anthracite étaient devenus de plus en plus rares et plus petits, et on avait fini par s'arrêter, de guerre lasse, après avoir traversé 40 à 50 mètres de schistes complétement stériles. Le prolongement de la galerie à travers bancs arrêté beaucoup trop tôt n'avait d'ailleurs rencontré que des bancs de grès et de poudingue qui continuaient à plonger uniformément au sud avec une inclinaison de 75 à 78°.

Relation entre les veines d'anthracite rencontrées dans ces deux exploitations.

Quant à la relation qui existe entre les couches de combustible rencontrées dans cette exploitation et celles des travaux proprement dits de Sincey, elle est facile à saisir : ce sont toujours les veines n°s 2 et 3 de la coupe générale attaquées par le puits n° 1 de M. W. de Perrin; quoiqu'un peu plus rapprochées, elles conservent encore entre elles une distance comparable à celle qu'elles ont dans les premiers travaux; la nature de leur mur et de leur toit n'a pas beaucoup varié, mais il y a eu transposition dans leurs épaisseurs : la veine n° 2 s'est amincie jusqu'à n'être plus exploitable; la veine n° 3, au contraire, a augmenté d'autant, et sous le rapport de l'exploitation l'a complétement remplacée.

C'est le meilleur exemple qu'on puisse montrer de cette tendance qu'ont les couches du terrain à se terminer en pointe : il semble qu'une couche n'y doive commencer que quand l'autre finit, et que deux veines voisines de quelque importance n'y puissent exister simultanément.

Autres recherches.

Beaucoup de fosses d'une petite profondeur ont été creusées dans le voisinage de deux exploitations principales, sur cette étendue de 15 à 1.800 mètres qu'occupe la partie renflée du terrain; nulle part elles n'ont fait espérer plus de deux bancs d'anthracite dignes de recherches, et souvent même le second banc correspondant à la quatrième veine de la coupe générale est resté inaperçu; toujours elles ont montré la persistance du combustible à affecter cette forme d'amas lenticulaires ou de noyaux qui exclut tout caractère de continuité.

Leur résultat général.

Affleurement du pont de Courcelles-Frémois.

Au pont de Courcelles-Frémois, le terrain houiller est déjà réduit à 200 mètres d'épaisseur; le profil du ravin très-ouvert en ce point, comme le montre la *fig.* 5, ne laisse perdre aucun des détails qui peuvent éclairer sur sa situation.

La rive droite du Serein est taillée dans un gneiss argentin à feuillets verticaux qui s'appuie sur un granite gris légèrement rosé à grains moyens, semblable à celui de tout le pays environnant à 5 ou 6 kilomètres à la ronde, et que termine au sommet du coteau un plateau de lias. Le pont est encore sur le gneiss; mais dès qu'on a le pied sur la rive gauche du ruisseau, on rencontre le porphyre quartzifère du mur du terrain houiller, et quelques mètres plus loin l'affleurement de ce terrain lui-même. Ce sont d'abord, sur les 50 à 60 premiers mètres, des poudingues alternant avec des grès et ne renfermant que quelques lits de schistes décolorés; puis les schistes deviennent plus fréquents et

plus épais et marquent mieux dans la tranche du terrain avec leur couleur noire ou lie-de-vin ; quelques bancs renferment des plaques de lydienne ; on en trouve des débris à la surface du sol. A mesure qu'on s'avance vers le toit, on ne rencontre presque plus que des alternances de grès fin encore dominants et de schistes feuilletés très-riches en empreintes végétales. On tombe enfin sur des eurites de couleur pâle rougeâtre, qui limitent brusquement l'affleurement houiller au sud, et qui dégénèrent promptement en un porphyre granitoïde qu'il est souvent difficile de distinguer du granite franc du plateau de Chamont, associé au gneiss comme le granite du mur.

On y constate, mieux que nulle part, l'allure du terrain.

Le plongement des couches dans tout cet affleurement est constamment de 80° au sud ; là encore on constate de la manière la plus certaine que le terrain n'a point de relèvement, et qu'aucune assise du toit ne peut être considérée comme la réapparition d'une assise du mur.

Cet affleurement était trop à découvert pour ne pas attirer l'attention dès l'origine des recherches ; c'est un des points où l'on a fait les premières fouilles, et c'est de là que, de proche en proche, on est venu aux affleurements plus importants des bois de la Charmée et Sincey. On voit encore dans un champ bordant la route de Courcelles-Frémois à Chamont, les restes d'un puits qu'on a foncé vers le milieu de la tranche du terrain, et qui, commencé dans le schiste, a été arrêté dans le grès, à une profondeur de 20 mètres, sans avoir rencontré d'anthracite.

Affleurement de Villars-Frémois

L'affleurement conserve sa largeur jusqu'à Thostes. Sur le territoire de Villars, on l'a mis à nu par des tranchées d'une petite profondeur qui ont donné beaucoup d'empreintes végétales, principalement des

fougères et des sigillaria. A Thostes (voir la *fig.* 6), un ravin, qui part de l'extrémité du village et qui aboutit au ruisseau des *Chênes*, est creusé suivant l'axe même de sa tranche; le terrain y est fortement comprimé entre ses deux murs de porphyre qu'on retrouve en saillie sur les bords du ravin; il y paraît aussi très-imprégné de silice : ses poudingues ont une extrême cohésion; ses grès sont presque aussi bien soudés que s'ils étaient fondus, mais toujours riches en empreintes végétales; ses schistes sont comme durcis, et il n'y a pour ainsi dire pas un de leurs bancs où l'on ne trouve enclavée quelque amande ou quelque veine de quartz lydien rubané. Il en résulte, pour toute cette partie de l'affleurement, une teinte générale de métamorphisme à laquelle ajoute encore l'action superficielle des eaux du pays, très-ferrugineuses comme on sait, et qui masque si bien la vraie nature de ses bancs, qu'on peut passer sur eux en venant du terrain primitif et en allant à l'arkose, dont les nappes recouvrent le sommet de tous les coteaux voisins et dont les filons sont partout dans le granite, sans soupçonner un terrain différent de celui qu'on quitte ou de celui qu'on cherche.

Affleurement de Thostes remarquable par la manière dont le terrain y semble modifié.

A l'est du plateau de Thostes, la tranche du terrain houiller, un instant recouverte par du lias horizontal, reparaît, toujours à peu près verticale, au milieu du porphyre et de l'eurite. Elle s'amincit insensiblement jusqu'au bois de Ruffey où elle n'a plus que 80 à 100 mètres d'épaisseur; on y distingue cependant encore deux masses principales de schistes qu'on a pu observer sur toute la longueur de la bande, et qui semblent correspondre à peu près aux deux veines d'anthracites séparés à Sincey par une distance de 105 à 110 mètres. La première masse, plus voisine du mur, est riche en lydienne; la seconde masse, qui se rapproche de plus

Affleurement du bois de Ruffey.

en plus de la première comme par l'effet d'un laminage incessant, est presque partout pyriteuse. Dans le voisinage du pont de Bierre, l'amincissement du terrain devient très-rapide, et au moment où ce terrain, représenté encore par du poudingue, du grès et du schiste, réduits presque à de simples lames, disparaît sous le porphyre, il porte l'empreinte d'une véritable torsion. Dans toute cette dernière partie de l'affleurement, du reste, on n'a ouvert de recherches qu'au bois de Ruffey; on y trouve encore les déblais d'un bout de galerie creusée, en 1835, dans le schiste, et d'un puits de 35 à 40 mètres de profondeur qui a traversé du schiste et du grès et donné beaucoup d'empreintes végétales, très-précieuses, parce que c'étaient les premières qu'on rencontrait et qu'elles fixaient les idées sur la vraie nature de ce terrain, bien fait pour inspirer des doutes.

Interruption du terrain houiller, à l'est, au pont de Bierre.

Quelques centaines de mètres après cette interruption, on perd également de vue le porphyre qui continuait à remplir la cassure du granite et qui disparaît sous le plateau liasique de Bierre. A partir de ce point, et en se dirigeant à l'est, le massif primitif et tout ce qu'il recèle est presque entièrement couvert par du lias et par les assises marneuses et calcaires du premier étage oolithique; on ne revoit le granite qu'au fond du ravin de l'Armençon, après une plaque de calcaire à gryphées de 7 kilomètres de largeur, et cette fois on y cherche en vain la trace du terrain houiller: si cependant ce terrain se poursuivait et si son interruption du pont de Bierre n'était que locale, on devrait retrouver sa tranche à peu près sur le prolongement de la ligne droite qu'elle suit si exactement depuis Sainte-Magnance jusqu'à Ruffey, et qui coupe l'Armençon un peu au-dessous de Montigny. Il n'en est point ainsi : on ne

Cette interruption paraît définitive.

rencontre dans le ravin de l'Armençon, à peu près à égale distance de Brianny et de Montigny, que la bande de gneiss et de micaschiste qui accompagnait le mur du terrain houiller et qui semble avoir participé, jusqu'à un certain point, à son dérangement, mais sans aucun indice de ce terrain. Cette bande elle-même n'a plus, depuis Flée, la même direction et s'infléchit beaucoup plus au sud. Il est donc extrêmement probable que l'interruption du terrain houiller est définitive; que là s'arrête ce lambeau si remarquable par la singularité de son gisement, et qu'il n'y a point à songer à tirer de lui d'induction sur aucune des plaques du même terrain qui peuvent exister sous la chaîne calcaire de la Côte-d'Or.

Conclusions. Quelques mots encore, en finissant, sur l'ensemble de ce terrain : j'ai rejeté bien loin, dès qu'elle s'est présentée à mon esprit, l'idée de supposer que le redressement de ses couches et leur espèce de plongement apparent sous le granite pouvaient tenir à une éruption du granite porphyroïde (1) ; cette supposition, en contradiction manifeste avec ce que l'on sait de l'âge des gra-

(1) Si l'on considère l'ensemble du plateau granitique de Thostes, Rouvray et Montberthaut, que la bande carbonifère de Sincey partage, de l'est à l'ouest, en deux parties d'étendue fort inégale, on remarque bientôt que le granite porphyroïde qu'on pourrait à distance être tenté de regarder comme plus récent que le reste du terrain primitif, n'y forme que des accidents sans corrélation aucune avec la ligne de l'affleurement houiller :

Au sud de cette ligne, ce granite ne commence à se montrer qu'entre Thostes et Aisy-sous-Thil, à 3 à 4 kilomètres de la bande carbonifère, et le champ qu'il envahit s'étend de plus en plus à mesure qu'on s'éloigne du terrain houiller et qu'on se rapproche du pays de Saulieu où l'on finit par ne rencontrer presque plus que lui.

Au nord de la même ligne, ce granite ne forme que des

nites du Morvan, et avec les données que fournit l'étude des éléments du terrain de Sincey lui-même, n'aurait pas supporté l'ombre d'une discussion ; je n'en parle ici que pour ne pas la laisser se produire sous forme d'objection imprévue ; il est clair, au contraire, que tout ce qu'on observe, tant de la situation de ce terrain que de sa composition intime et des associations de roches primitives du pays environnant, paraît démontrer que le granite n'a joué dans ce bouleversement que le rôle inerte d'une écorce solide qui se brise sous l'action d'une force interne (probablement une force de plissement) entraînant avec elle, dans sa rupture et dans son mouvement de bascule, les roches stratifiées dont elle était recouverte. J'en vois surtout la preuve dans cet alignement, si droit sur une si grande longueur, de la tranche du terrain houiller qui marque exactement le plan de la brisure, la faille, ou, pour mieux dire, le joint des deux parties fracturées puis violemment rap-

---

amas ou des taches de quelques centaines de mètres à peine de diamètre, se fondant de toutes parts avec une gradation ménagée dans le granite à grains moyens associé au gneiss. Trois de ces taches méritent seules d'être citées : l'une, celle de la Charmée, s'avance presqu'au contact du mur du terrain houiller ; les deux autres, celles de Bourbilly et de Vieux-Château, sont distantes de 2 kilomètres environ de ce mur.

Il y a loin de là, pour ce granite porphyroïde, à une disposition d'ensemble et à une importance comme masse, qui pussent permettre de lui faire attribuer une relation quelconque avec le redressement et l'orientation en ligne droite du terrain houiller de Sincey.

Je rappelle enfin, et c'est une raison qui pouvait me dispenser d'entrer dans plus de détails, qu'on rencontre à l'état de galets, non-seulement dans le terrain de Sincey, mais aussi dans les poudingues et conglomérats des terrains houillers d'Épinac et Blanzy, un granite porphyroïde en tout semblable à celui-ci. Son antériorité au dépôt du terrain houiller est donc un fait constant dans toute cette contrée.

prochées. Cette propriété d'affecter des lignes en quelque sorte tirées au cordeau, est un caractère constant des failles telles qu'on les observe beaucoup mieux dans les terrains stratifiés ; dans les assises jurassiques, par exemple, il n'est pas rare d'en trouver qu'on peut suivre en ligne droite sur une longueur de plus de 40 kilomètres, et souvent, sur leur trajet, on rencontre des bancs bouleversés et placés sur la tranche, comme notre terrain de Sincey, entre des massifs restés à peu près horizontaux mais dénivelés. Les failles ne sont plus, en général, reconnaissables dans les terrains primitifs, quand les terrains stratifiés que supportaient ceux-ci ont disparu, enlevés par les érosions ; nous devons au terrain houiller de Sincey de nous avoir conservé la trace d'une de ces failles antérieure, très-probablement, au dépôt du *trias* et certainement, au moins, à celui du *lias*, dirigée à peu près E. 3° S.

Quant à cette *pointe* de métamorphisme qui sans être nulle part bien décidée, même dans l'affleurement de Thostes où elle est le plus apparente, distingue cependant les roches de ce terrain de celles des bassins houillers d'Épinac et d'Autun dont il est si naturel de chercher à le rapprocher, elle est due principalement à l'abondance d'un ciment de silice calcédonieuse qui a soudé les éléments du poudingue et du grès et jusqu'aux molécules du schiste. Cette silice, il n'est pas difficile d'en trouver les sources: comme je l'ai montré, elle est en grande partie contemporaine du dépôt du terrain, puisqu'elle s'y est concentrée en veines de jaspe et en nombreux amas de lydienne placés au cœur et dans le sens des bancs ; il ne faut pas oublier cependant que la bande carbonifère traverse dans toute son étendue la région que recouvrent l'arkose et le lias silicifié, et l'on reconnaîtra qu'il n'est pas

impossible qu'à cette première silice soient venues s'ajouter des infiltrations siliceuses de l'époque de l'arkose liasique. L'action des porphyres (1) n'y est pour rien ou presque rien : nulle part en effet ils n'ont modifié au contact ; ils n'ont agi sans doute qu'en trop faible masse et non point en masses comparables à celles qui ont traversé et baigné les terrains de transition. Bien plus grande, sans contredit, a été l'action résultant de la compression et de la trituration exercée par les parois inertes du gîte : c'est elle que trahissent à chaque pas et l'état d'écrasement du poudingue et la texture écailleuse de l'anthracite, et les innombrables surfaces de glissement du grès et du schiste.

Sous le rapport, enfin, de l'avenir industriel du gîte, je suis loin de considérer comme définitives les recherches de combustible tentées jusqu'ici dans ce terrain,

---

(1) M. Rozet qui a parlé du terrain houiller de Sincey dans son mémoire sur le massif de montagnes qui sépare la Loire du Rhône et de la Saône (Mémoires de la Société géologique de France, t. IV, p. 99 et 100, 1840) de manière à appeler sur lui l'attention, a signalé des filons et des masses transversales de porphyre et d'eurite intercalés au milieu des affleurements houillers. J'ai souvent cherché ces masses éruptives sans jamais en rencontrer ; on comprend toutefois, que dans le mouvement violent auquel a été soumis ce terrain quand il a été soulevé et en quelque sorte jeté entre les parois de la faille granitique, il ait dû s'y produire des brisures de détail et des fentes dans lesquelles l'injection de porphyre a pu tout aussi bien pénétrer que dans les joints de son toit et de son mur ; et si aucun de ces filons n'apparaît au jour, il est à présumer qu'il en existe dans la profondeur et qu'on ne manquerait pas d'en trouver si l'on se rapprochait des points où se réunissent les deux nappes porphyriques qui l'embrassent. M. Rozet, au lieu de voir dans l'éruption de ce porphyre un simple accident de détail, en a fait la cause du redressement du terrain houiller, et a attribué au dégagement de chaleur qui l'a accompagnée, et dont, à mon sens, il s'est beaucoup exagéré l'influence, l'état modifié de ce terrain.

mais je ne saurais prendre sur moi d'en conseiller de nouvelles. Deux causes se réunissent en effet pour y faire présager presqu'à coup sûr de la stérilité : sa nature première, d'abord, qui le condamnait comme terrain houiller inférieur et peu développé, indépendamment du froissement que plus tard ses couches devaient subir, à ne renfermer que du charbon sec en amas discontinus ; son état tourmenté, ensuite, dont le premier effet a été de produire un véritable laminage de ces amas de charbon. Si jamais cependant ces travaux devaient être repris, ce ne serait que dans la partie la plus large de l'affleurement, dans le vallon de Sincey, que je leur verrais quelques chances de succès.

EXPLICATION DES PLANCHES.

Figure 1.

Profil du terrain houiller de Sincey et du terrain primitif encaissant, dirigé du sud au nord, perpendiculairement à la bande carbonifère, passant par Sincey et Vieux-Château.

G Granite gris légèrement rosé, à mica noir verdâtre, à gros grains et à grains moyens, du plateau de Rouvray, passant insensiblement au granite G_1.

G_1 Granite rose à grains moyens à feldspath orthose rosé à quartz gris, à mica verdâtre de moins en moins abondant, passant insensiblement à la pegmatite P.

P Pegmatite rose graphique à grains moyens et à gros grains, commençant à se montrer, 250 à 300 mètres avant le village de Sincey, et formant une longue bande dirigée à peu près de l'est à l'ouest, tantôt s'élargissant, tantôt se rétrécissant ; souvent décomposée ; passant insensiblement au granite G_2.

G_2 Granite rose à grain fin et homogène, à une seule variété de feldspath (orthose) comme les granites précédents, à mica verdâtre.

e Filons d'eurite rougeâtre souvent altérée à la surface par un commencement de décomposition.

Une masse épaisse de cette eurite forme le toit du terrain houiller, sur la ligne que suit cette coupe, et dégénère un peu plus loin en un porphyre quartzifère π identique à celui du mur du terrain houiller.

H Terrain houiller.

π Porphyre quartzifère à pâte euritique blanche, rougeâtre, rouge et quelquefois noir bleuâtre, à grains amorphes et à cristaux bipyramidés de quartz gris, et à très-petits cristaux de feldspath orthose. Décomposé par places et terreux.

S Micaschiste et gneiss à feuillets verticaux très-froissés et contournés, tantôt de couleur rouge lie-de-vin, tantôt bronzés et dorés suivant les reflets du mica, avec filons et amas de granite, de pegmatite et de quartz, passant au granite G_3.

G_3 Granite rose à grains serrés, tenant le milieu pour la grosseur du grain entre G_1 et G_2; à feldspath orthose rose clair et à mica bronzé semblable à celui du micaschiste et du gneiss associés, présentant aussi des veines du même grain que G_2; passant insensiblement, près de Vieux-Château et de la Charmée, par l'apparition de grands cristaux de feldspath orthose, au granite porphyroïde G_4 bien caractérisé.

G_4 Granite porphyroïde gris, rosé, ou rougeâtre par places, à une seule variété de feldspath, à grands cristaux de feldspath orthose très abondant. Granite de Vieux-Château, la Charmée, etc.

L Lias calcaire du plateau d'Époisses. En bancs très-faiblement inclinés au nord-est.

L_1 Plaque de lias inférieur entièrement silicifié, blanc grisâtre, à grain fin très-serré, très-coquillier.

Figure 2.

Plan des recherches proprement dites de Sincey (exploitation commencée par M. de Nansouty et continuée par M. W. de Perrin).

Les couches n'ont pas tout à fait dans ces travaux la direction générale de la bande carbonifère; elles sont déviées de 11 degrés au sud; mais à peu de distance de là, avant l'exploitation de *la Charmée*, elles reprennent la direction E. 3° S.

A Puits n° 1, de 63 mètres de profondeur.
B Chambre d'accrochage.
CC Grande galerie à travers bancs de 205 mètres de longueur.
f Canonnière n° 1 (magasin à poudre).
k Canonnière n° 2.
DD Galerie au charbon.
EE Grande galerie au charbon.
H Puits du bois, profond de 62 mètres,
I Chambre d'accrochage.
GG Galerie au charbon, retour d'air.

Figure 3.

Coupe des travaux de recherches de Sincey.

Cette coupe est dirigée suivant la galerie à travers bancs CCC du plan (*fig.* 2). On en a prolongé le profil jusqu'au toit euritique et granitique du terrain houiller pour bien montrer quelle est l'épaisseur de terrain encore inexplorée.

Figure 4.

Coupe des travaux de recherches de la Charmée.

Cette coupe, passant par le puits et la galerie à travers bancs de l'exploitation de Mme de Candras, est dirigée perpendiculairement aux couches, c'est-à-dire à très-peu près du nord au sud.

Elle complète les indications de la *fig.* 2 : on en a étendu le profil jusqu'au hameau de la Charmée, afin de représenter la disposition des couches dans le voisinage du mur ; disposition facile à observer dans les ravins du bois de la Charmée.

L'ensemble de ces deux coupes qu'on peut raccorder entre elles à la dernière veine d'anthracite, quoiqu'elles soient prises à 800 ou 1.000 mètres de distance l'une de l'autre, représente parfaitement le profil total du terrain dans l'endroit, à peu près, où il est le plus développé.

Figure 5.

Profil du terrain houiller et du terrain primitif encaissant au pont de Courcelles-Frémois.

a Calcaire à gryphées arquées silicifié et transformé en roche de quartz calcédonieux noir et gris, moucheté de galène, de baryte sulfatée et de chaux fluatée.

b Lumachelles et marnes infra-liasiques imprégnées de fer oligiste provenant d'un épanchement contemporain de l'arkose liasique.
c Arène granitique pénétrée de petits filons et de nids de galène de baryte sulfatée et de chaux fluatée.
H Terrain houiller, plongeant à 80° au sud.
π Porphyre quartzifère du mur.
π_1 Porphyre et eurites du toit.
X Granite gris rosé à grains moyens et à grains fins à un seul feldspath (l'orthose) passant insensiblement au gneiss *y*.
Y Gneiss gris jaunâtre argentin, à grain serré et à feuillets verticaux, dégénérant en micaschiste à grandes lames, sur les bords du Serein.
X_1 Granite rose et gris à grains plus gros que X, à un seul feldspath (l'orthose) ; dégénérant fréquemment en pegmatite à gros grains; associé au gneiss Y_1.
Y_1 Gneiss semblable à Y ; dégénérant par places en un micaschiste à beaucoup moins grands feuillets.
L Lias inférieur du plateau de Chamont, avec minerai de fer.

Figure 6.

Coupe du plateau liasique de Thostes, dirigée du nord au sud passant par le clocher de Thostes.

Cette coupe montre comment le lias repose horizontalement à Thostes sur la tranche du terrain houiller plongeant de 78° au sud.

c Calcaire à gryphées arquées silicifié. Toit du minerai de fer.
m Banc de marne argileuse à pâte fine de 0m.75 à un mètre d'épaisseur, intimement imprégné de fer oligiste, exploité pour minerai de fer.
l Alternances de petits bancs de lumachelles calcaires infra-liasiques et de minces lits marneux et argileux.
g Grès infra-liasique.
h Terrain houiller.

RAPPORT

sur un

NOUVEAU PARACHUTE CONSTRUIT PAR M. FONTAINE, CHEF D'ATELIER DE LA COMPAGNIE DES MINES D'ANZIN,

Par M. COMTE, ingénieur des mines.

Dans les mines de houille du département du Nord, les ouvriers se rendent à leur ateliers souterrains et remontent à la surface du sol par les échelles. Elles offrent certainement le moyen le plus sûr de pénétrer dans les travaux et d'en sortir; mais leur usage a de très-graves inconvénients, surtout quand les exploitations s'opèrent à des profondeurs considérables. Indépendamment du temps et de la grande dépense de force musculaire qu'il absorbe sans utilité, il exerce sur la constitution des hommes une influence très-fâcheuse.

Malgré ces graves inconvénients, les échelles étaient, il y a peu d'années, la seule voie offerte aux mineurs, dans le département du Nord, pour descendre ou remonter par les puits. Elles sont encore exclusivement employées dans toutes les exploitations autres que celles de la compagnie d'Anzin, et même, à un petit nombre d'exceptions près, dans toutes les fosses de cette compagnie.

Mais plusieurs de ces fosses ont aujourd'hui une très-grande profondeur. On exploite par certaines d'entre elles à plus de 500 mètres au-dessous de la surface du sol. On ne pouvait, tant que les choses sont restées dans leur ancien état, occuper dans ces fosses que des

hommes jeunes et vigoureux auxquels, pour les profondeurs de 400 mètres et au delà, une prime de 0f,25 par jour était accordée en dehors du salaire habituel, et à titre d'indemnité pour la perte de temps et la fatigue occasionnées par les échelles. Quelques-unes des fosses dont il s'agit sont destinées à être encore creusées au-dessous du niveau actuel de leur fond. La compagnie d'Anzin s'est donc trouvée conduite par la question d'humanité d'abord, et aussi par son intérêt bien entendu, à chercher les moyens de descendre et de remonter mécaniquement les mineurs dans les puits. Il était impossible d'utiliser dans ce but les tonneaux servant habituellement à l'extraction. Ces tonneaux ne présentant qu'une petite capacité (7 hectolitres 1/2), et n'étant en outre susceptibles d'être mis en mouvement qu'avec une vitesse limitée, leur emploi eût exigé pour le transport de tous les ouvriers d'une fosse un temps considérable. Cet emploi était d'ailleurs trop dangereux; il n'était permis de le tenter qu'à la condition d'établir préalablement des guides destinés à conduire les appareils d'extraction. Avec ces guides, la vitesse des machines pouvait effectivement être augmentée dans un assez grand rapport; on rendait impossible la rencontre des bennes qui se meuvent en sens contraire; on évitait les chocs contre les parois des puits; on faisait disparaître, en un mot, les causes principales d'usure et de détérioration des câbles ou de l'attirail que chacun d'eux supporte : on pouvait donc se servir de ces engins avec beaucoup plus de sécurité.

C'est, par suite, vers l'installation de guides dans ses fosses profondes que la compagnie d'Anzin a dirigé ses efforts, et déjà elle a tenté à ce sujet plusieurs expériences.

La première a été faite en 1843 à la fosse Saint-Louis

(concession de Raismes). On a tendu dans cette fosse, sur toute sa hauteur, des câbles ronds en fil de fer qui servent à conduire les berlines en tôle dans lesquelles on remonte soit les hommes, soit le charbon.

A la fosse du Chaufour, également située dans la concession de Raismes, on emploie depuis 1849 des cages d'extraction dans lesquelles sont placés les wagons qui contiennent la houille. Ces cages sont guidées par un chemin de fer vertical : elles servent à descendre et à remonter les mineurs.

Enfin on vient d'établir dans le puits Tinchon (concession d'Anzin) des guides en bois sur lesquels se meuvent également des cages utilisées pour l'entrée et la sortie des ouvriers.

Il est incontestable que l'établissement des guides a été une très-grande amélioration. Toutefois, avec ces guides, les hommes sont encore exposés aux chances de rupture des cordes; on doit donc exercer sur ces cordes une surveillance minutieuse, et les changer longtemps avant qu'elles ne soient réellement hors d'usage. C'est ainsi qu'au Chaufour, fosse dans laquelle existe à la vérité un foyer d'airage, et par conséquent une cause particulière de destruction, les câbles n'ont fait quelquefois qu'un service de quatre mois, et ont dû être placés ensuite sur un autre puits pour extraire uniquement du charbon.

M. Fontaine, chef de l'atelier des bois au chantier de construction de la compagnie d'Anzin, s'est proposé de prolonger la durée des câbles d'extraction et de prévenir les terribles accidents dont les mineurs sont victimes quand ces câbles viennent à casser. Il a utilisé dans cette vue les guides en bois récemment montés dans la fosse Tinchon, et imaginé un parachute destiné à retenir sur ces guides, en cas de rupture de la corde,

la cage dans laquelle les ouvriers se placent pour descendre ou monter dans le puits.

Un mécanisme destiné au même but avait déjà été imaginé par M. Machecourt, ancien élève de l'École des mineurs de Saint-Étienne; son principe est exactement le même que celui de l'appareil de M. Fontaine. Il a été succinctement décrit par l'inventeur dans le tome VII de la 4e série des *Annales des mines*, p. 493.

Guides.

La fosse Tinchon, une des plus anciennes parmi celles encore en activité dans les diverses exploitations de la compagnie d'Anzin, atteint aujourd'hui la profondeur de 540 mètres. Les parois ont participé au mouvement produit dans le terrain par l'enlèvement de la houille et le tassement des remblais; elles ne sont plus exactement verticales, et la fosse elle-même n'a plus partout des dimensions constantes ni une section parfaitement circulaire. Son plus grand diamètre est de 2m,70, le plus petit de 2 mètres. Le cuvelage est octogonal, et le diamètre du cercle inscrit est de 2m,60. Telles sont les conditions dont il a fallu tenir compte pour l'installation des guides et l'organisation des cages.

Les guides *g*, *g* (Pl. III, *fig.* 1, 2, 4 et 6) sont en sapin; leur section est de 0m,20 sur 0m,12. Les bois qui les constituent ont été choisis de manière à présenter le moins de nœuds possible : ils doivent en effet se laisser pénétrer facilement par les griffes du parachute. Ces bois, de longueur variable, sont réunis bout à bout par des traits de Jupiter, et assemblés sur des traverses *t*, *t* (*fig.* 1, 4 et 6) placées de 3 mètres en 3 mètres dans le puits. Ces traverses ou bois d'entrefends sont en chêne, et ont un équarrissage de 0m,20 sur 0m,125. Sur la hauteur occupée par la nappe aquifère du terrain crétacé, elles sont ajustées sur le cuvelage, clouées à leurs extrémités et maintenues par

des patins. Partout ailleurs elles sont simplement encastrées dans la maçonnerie du puits, et y pénètrent d'environ $0^m,20$ à chaque bout.

Les guides portent, par des entailles de 2 à 3 centimètres de profondeur, sur les traverses auxquelles ils sont boulonnés. Les boulons ont un diamètre de 18 millimètres. Ils servent conjointement avec les traits de Jupiter, qui doivent ainsi se trouver chacun à la hauteur d'une traverse, à assembler les longrines destinées à conduire les cages. Leurs têtes, bombées, sont logées dans des cavités ménagées du côté de la surface antérieure des guides, de manière à se trouver à une distance de cette surface égale à $0^m,03$ au moins. Ces dispositions ont pour but de permettre aux griffes du parachute de s'enfoncer dans le bois, quel que soit le point de la fosse où se trouve la cage lorsque la rupture de la corde aura lieu. Cette condition ne serait évidemment pas remplie si ces griffes étaient exposées à rencontrer, à la surface des guides, les têtes des boulons; peut-être pourraient-elles atteindre ces boulons, si par suite du poids et de la vitesse de la cage, un choc violent avait lieu; mais alors elles glisseraient sur la courbure convexe de leurs têtes pour s'engager plus profondément dans le bois.

Les deux guides d'une même cage sont placés l'un vis-à-vis de l'autre, et leurs faces antérieures présentent un écartement qui devrait être partout de $1^m,20$ seulement; mais, par suite d'imperfections dans le montage, cet écartement est souvent plus considérable. Nous l'avons trouvé, en trois points différents, de $1^m,215$, de $1^m,217$ et de $1^m,212$.

Deux systèmes de guides sont établis dans le puits, l'un pour la cage qui monte, l'autre pour celle qui des-

cend. Ces deux systèmes sont installés à 0^m,85 l'un de l'autre, distance mesurée d'axe en axe.

Cages d'extraction.

La cage (*fig.* 1 et 2) est à deux étages, et disposée pour recevoir deux wagons contenant chacun 5 hectolitres de charbon. Elle se compose d'abord de trois châssis horizontaux en chêne ayant extérieurement 1^m,14 de longueur et 0^m,675 de largeur. Entre le châssis inférieur *ef* et le châssis intermédiaire *cd*, il existe un intervalle de 1^m,35; de ce dernier au châssis supérieur *ab*, la distance est de 1^m,73.

Les trois châssis sont réunis entre eux par des montants en frêne présentant une section de 0^m,10 sur 0^m,05. Ces montants *h*, au nombre de six, sont appliqués trois par trois sur les longs côtés des châssis, et fixés par des équerres en fer. Ils laissent entre eux des intervalles de 0^m,30 de largeur, remplis en partie par des madriers en chêne de 1^m,24 sur 0,03. Ces madriers *m* sont assemblés sur les châssis au moyen de vis à bois.

Sur le cadre inférieur *ef* et sur celui intermédiaire *cd* sont établis des planchers destinés à supporter les deux wagons contenant la houille. Le cadre supérieur *ab* est complétement libre à son intérieur; c'est entre les côtés de ce cadre qu'est placé et que fonctionne le mécanisme du parachute.

D'après les détails qui précèdent, le châssis supérieur de la cage supporte le poids des deux étages, celui des wagons et de la houille qu'ils renferment. Ce châssis est lui-même suspendu à une très-forte traverse en fer *kl* parallèle à ses longs côtés placée à égale distance de chacun d'eux, et qui se termine à ses deux extrémités par des fourches destinées à embrasser les

deux guides d'un même système et à glisser le long de ces guides.

La cage n'est pas seulement engagée sur les longuerines par les deux fourches dont nous venons de parler. Elle est encore pourvue de coussinets en fonte boulonnés sur les petits côtés du châssis inférieur *ef*. Ces coussinets *s* ont intérieurement la même forme que les fourches et remplissent le même office.

La traverse *kl* se trouve à une petite hauteur au-dessus du châssis *ab*. La distance de son axe horizontal au plan de la surface supérieure de ce châssis est de 0m,19 seulement.

Cette traverse et le châssis sont rendus solidaires par deux fortes barres de fer méplat *p,p* de 0m,090 de largeur moyenne sur 0m,018 d'épaisseur. Ces barres passent sur la traverse à laquelle elles sont réunies par des boulons, et viennent saisir par-dessous les longs côtés du châssis *ab*. Elles sont également fixées sur ce châssis par des boulons et des écrous.

Le châssis *ab*, la traverse *kl* et les deux chevrons en fer *p*, *p* forment en quelque sorte la charpente sur laquelle vient s'appliquer la couverture de la cage. Cette couverture se compose de deux portes en tôle *u*, de 2 millimètres d'épaisseur, mobiles autour de charnières *v* placées sur les madriers *m*. Non-seulement ces deux portes reposent sur le système que nous venons de décrire : elles s'appuient encore à leurs extrémités sur des supports *qr* consistant en barres de fer de 0m,060 de largeur sur 0m,006 d'épaisseur. Ces barres, comme celles *p*, embrassent à la fois la traverse *kl* et le châssis *ab* sur lequel elles sont simplement vissées. L'ensemble, vu le peu de portée des pièces qui le composent, présente une très-grande solidité et constitue un chapeau destiné, en cas de rupture de la corde, à pro-

téger contre la chute de cette corde et des chaînes d'attache qui la terminent, les ouvriers placés dans le compartiment supérieur de la cage.

Il nous reste à dire comment cette cage est suspendue au câble d'extraction. La traverse *kl*, formant l'arête culminante du chapeau, est percée en son centre d'un œil cylindrique de $0^m,063$ de diamètre dans lequel passe la tige du crochet de la cage. Cette tige porte une pièce fixe en fer *n*, dépendant du parachute et dont il sera question dans un instant. C'est sur cette pièce fixe que vient reposer la traverse *kl* et que porte par conséquent toute la charge. Le crochet de la cage est enfin saisi par le crochet à ressort de la corde (*fig.* 4 et 5).

Le court exposé que nous venons de faire au sujet des guides et des cages de la fosse Tinchon est incomplet et ne suffirait pas pour expliquer comment s'opère le service de l'extraction. Mais nous n'avons pour but que de décrire le parachute de M. Fontaine : nous nous sommes donc borné à signaler dans la disposition du puits et ses accessoires les éléments indispensables pour l'intelligence du jeu de l'appareil.

Parachute. Cet appareil est monté sur chacune des deux cages. Voici de quelle manière il est construit.

Les *fig.* 4 et 5 représentent le parachute tel qu'il est monté sur la cage d'extraction ; seulement tous les détails de cette cage ne sont pas reproduits ; on n'a indiqué que ceux qui concourent au jeu de l'appareil et doivent être considérés comme faisant partie essentielle du système.

Crochet d'attelage. Ce crochet, entièrement en fer forgé (*fig.* 7 et 8), présente à l'extérieur, suivant son arête culminante, une crête ou saillie sur laquelle sont rivées deux feuilles de tôle de 2 à 3 millimètres d'épaisseur. Ces

feuilles de tôle sont verticales et découpées de manière à former par leur juxtaposition un plan incliné AB dont nous indiquerons tout à l'heure la destination. Chacune d'elles porte en outre à l'arrière une bride sur laquelle est fixée par des rivets, à angle droit sur les deux premières, une troisième feuille de tôle BCD taillée en forme d'éventail. Celle-ci s'élève jusqu'au sommet du plan incliné AB et vient, en diminuant successivement de largeur, se terminer sur la courbure extérieure du crochet.

Une lame d'acier EF, faisant fonction de ressort, est attachée par deux boulons sur le bec de ce crochet. Elle ne laisse entre son extrémité F et la tige GH qu'un intervalle de 16 millimètres. Mais, par suite de l'élasticité du ressort, cet intervalle peut s'agrandir, par exemple, dans le cas d'une pression ou d'un choc agissant de l'intérieur à l'extérieur, et laisser un passage de plus de 16 millimètres de largeur.

Voici maintenant quel est le but de ces dispositions : Supposons le crochet à ressort du câble d'extraction engagé dans le crochet de la cage et cette cage en mouvement dans le puits. Admettons encore que le câble se rompe sous la charge et que le parachute produise son effet. La cage restera suspendue sur les guides; et si le crochet de la corde ne peut pas se dégager brusquement, cette corde et les chaînes d'attelage qui en dépendent tomberont et resteront amoncelées sur le chapeau qui protége les ouvriers. Il en résultera d'abord un choc plus ou moins violent, et ensuite une augmentation considérable du poids que le parachute doit supporter. C'est dans le but d'éviter ces effets que M. Fontaine a combiné, comme nous venons de le dire, le crochet de la cage. Dès que le câble est rompu, son crochet glisse le long du plan incliné AB, et vient né-

cessairement frapper le ressort EF. Ce ressort s'ouvre alors ou se brise, et le câble devenu indépendant peut tomber au fond du puits. Tel est le résultat que M. Fontaine s'est proposé d'atteindre. Nous dirons plus loin, en rendant compte des expériences auxquelles le parachute a été soumis, jusqu'à quel point ce résultat a été obtenu.

Traverse supérieure en fer de la cage.

Nous avons déjà donné au sujet de cette traverse KL des détails suffisants. Nous rappellerons seulement qu'elle est percée en son centre d'un œil cylindrique de 63 millimètres de diamètre. La partie GH de la tige du crochet passe dans cet œil et peut s'y mouvoir facilement dans le sens vertical.

Chape servant de support.

En dessous de la traverse supérieure KL, une pièce horizontale en fer *n* est engagée à demeure sur la vis à filets rectangulaires de la tige du crochet. Cette pièce (*fig.* 9, 10 et 11) est terminée à ses deux extrémités par des chapes dans lesquelles les bras du parachute sont assemblés à articulation.

Lorsque l'on suspend la cage au câble d'extraction, la tige GH du crochet d'attelage glisse dans l'œil M de la traverse KL jusqu'à ce que la chape *n* soit en contact avec cette traverse. C'est alors sur la chape que porte directement toute la charge. Il est important que ce mode de suspension soit invariable, que la tige du crochet ne puisse pas, par exemple, prendre en se dévissant un mouvement relatif. La stabilité de l'assemblage est obtenue au moyen d'un boulon P (*fig.* 9), qui traverse la chape et pénètre jusqu'à une certaine profondeur dans une cavité ménagée sur la tige du crochet. Elle est encore garantie par un écrou Q (*fig.* 2 et 4) placé sous la chape et serré contre elle.

Traverse à coulisses.

Cette traverse en fer RS (*fig.* 12 et 13) est fixée par des boulons et des écrous sous le châssis supé-

rieur en bois *ab* de la cage. Elle présente à son centre un œil cylindrique T, de 38 millimètres de diamètre, dans lequel passe l'extrémité de la tige du crochet.

La traverse RS est pourvue des deux côtés de fourches ou coulisses dans lesquelles doivent glisser les bras du parachute. Ces coulisses sont complétement ouvertes à leurs extrémités et terminées vers le centre de la traverse par des plans inclinés U,U dont la pente est déterminée. Nous verrons ci-après d'après quelles conditions cette pente est calculée et à quoi servent les deux plans inclinés.

Ces bras, au nombre de deux, sont en fer forgé et de la forme indiquée sur les *fig.* 4, 14, 15 et 16. Ils sont armés à l'une de leurs extrémités de griffes aciérées destinées à mordre dans les guides. Ils pénètrent par l'autre extrémité dans les chapes de la pièce horizontale *n* et y sont retenus par des boulons à clavettes. Bras du parachute

Les bras du parachute passent dans les coulisses de la traverse RS : ils sont mobiles, le long de ces coulisses, autour de leurs axes de suspension, et peuvent par suite former entre eux un angle variable. Dans l'état ordinaire des choses, lorsque la cage est suspendue au câble d'extraction, cet écartement est tel que les extrémités des griffes sont à une distance l'une de l'autre un peu moindre que l'intervalle $1^m,20$ entre les deux guides. Cette distance est de $1^m,15$, et la traverse à coulisse RS est construite de telle manière que les bras du parachute s'appliquent alors exactement sur les plans inclinés U. Dans ces conditions la cage peut monter ou descendre dans le puits sans que les griffes touchent la surface antérieure des guides. Mais si l'on suppose que la tige du crochet d'attelage soit rappelée de haut en

bas, il est clair que la chape *n* se rapprochant de la traverse fixe à coulisses RS, les deux bras du parachute vont glisser sur les arêtes supérieures U des plans inclinés qui les supportaient d'abord. Ces bras s'écarteront donc l'un de l'autre en restant dans le même plan vertical, et la distance entre les deux griffes augmentera d'autant plus que le déplacement relatif de la tige du crochet aura été plus étendu. Cette distance pourra devenir égale à celle qui sépare les deux guides; les griffes tendront alors à s'imprimer dans le bois : elle deviendrait même plus considérable si les guides n'existaient pas; elle pourrait en effet alors augmenter jusqu'à ce que la partie GH de la tige du crochet vint reposer par sa base sur l'œil T de la traverse RS. A partir de cette position et en soulevant les deux griffes à la main, on aurait même la faculté d'accroître encore leur écartement. Cet écartement ne serait plus limité que par la rencontre des bras du parachute avec les petits côtés du châssis supérieur *ab* de cage.

Ressort à boudin. Il ne nous reste plus, pour compléter la description du parachute, qu'à exposer comment est produit le mouvement vertical de rappel de la tige du crochet de la cage. Ce mouvement est obtenu à l'aide d'un ressort à boudin dans l'intérieur duquel passe l'extrémité de la tige HI. Ce ressort est la pièce la plus importante de l'appareil de M. Fontaine, lui seul met en jeu le mécanisme et détermine son action sur les guides.

Le ressort est formé d'un boudin d'acier de 8 millimètres de diamètre. Il est enfermé dans deux boîtes cylindriques en fer A',B' (*fig.* 4). Ces deux boîtes, susceptibles de glisser facilement l'une dans l'autre et de permettre ainsi une certaine compression ou une certaine extension du ressort, sont disposées

de telle sorte que la plus large soit au-dessus de l'autre et lui serve en quelque sorte de couvercle. De cette manière, le vide qu'elles laissent entre elles a son ouverture dirigée vers le bas, et aucun corps étranger ne peut s'y introduire. Les deux boîtes dont nous parlons sont destinées à maintenir le ressort dans le cas où il viendrait à se briser et à lui permettre encore de fonctionner. Leurs fonds sont percés et traversés, comme le ressort lui-même, par la tige H du crochet de la cage.

Le ressort à boudin et les deux boîtes qui le contiennent sont placés sous la traverse à coulisses RS et pressés contre elle par un écrou C' (*fig.* 4) dont une clavette assure la fixité. Entre cet écrou et la boîte inférieure on interpose une rondelle, qui n'a d'autre destination que de permettre, suivant qu'elle occupe une hauteur plus ou moins grande, de donner au ressort le degré de compression voulu.

Ce ressort, lorsqu'il est complétement détendu, présente une hauteur de $0^m,195$: il se compose de 16 spires. Quand il est comprimé de telle sorte que ces spires soient en contact, sa hauteur se réduit à $0^m,128$. Dans l'état de tension où il se trouve habituellement sur la cage, il présente une longueur de $0^m,148$. C'est à cet état de tension que correspond l'écartement normal $1^m,15$ des deux griffes du parachute.

Le ressort à boudin pourrait donc, si son action était complétement libre, s'allonger de $0^m,195 - 0^m,148$ ou 47 millimètres. Ayant alors son point d'appui sur la traverse fixe à coulisses RS, il ferait descendre de cette quantité la tige du crochet de la cage et la chape *n*. Les deux bras du parachute s'ouvriraient, et lorsque le ressort aurait pris toute son extension, l'écartement des griffes se trouverait porté à $1^m,30$ environ. Mais les

choses ne se passent pas ainsi au moment de la rupture de la corde. Le ressort ne peut en effet se détendre que jusqu'au moment où les griffes ont rencontré les guides. Or l'intervalle entre ces guides est toujours beaucoup moindre que 1m,30. Le ressort à boudin ne doit donc prendre, pour déterminer le jeu de l'appareil dont il dépend, qu'une partie de l'allongement dont il est susceptible.

Au moyen des détails qui précèdent, il est facile de comprendre comment se comporte le parachute.

Action du parachute. Au moment où l'on accroche le câble d'extraction sur la cage et où la machine motrice enlève cette cage, le ressort, qui était complétement développé et qui occupait par conséquent sa longueur maximum 0m,195, se comprime jusqu'à ce que la chape *n* ait été amenée au contact de la traverse supérieure KL. Toute la charge est alors appliquée sur cette chape, et le système est combiné de telle sorte que le ressort n'ait plus qu'une hauteur de 0m,148.

Si le câble se rompt pendant que la cage est en mouvement dans le puits, le ressort s'allonge d'une certaine quantité moindre que 0m,47. Le crochet d'attelage et sa tige sont instantanément rappelés de haut en bas de la même quantité : la chape *n* est brusquement écartée de la traverse KL, et les deux griffes du parachute s'impriment sur les guides. Au même instant la cage tombe d'une hauteur égale à l'allongement du ressort à boudin. Dans ce mouvement relatif de la cage, la traverse à coulisses RS comprime le ressort d'une quantité précisément égale à l'extension qu'il avait reçue d'abord. Ce ressort reprend donc sa longueur habituelle 0m,148, et la traverse supérieure KL rencontre la chape *n* en produisant sur cette dernière un choc d'autant plus violent que la charge

est plus considérable. Ce choc fait pénétrer les deux griffes dans les guides, et la cage reste suspendue sur ceux-ci après être descendue en masse d'une certaine hauteur, toujours peu considérable, en rapport avec l'enfoncement des griffes.

Ainsi, le ressort éprouve brusquement deux effets égaux et de sens contraire : il s'allonge d'abord et se comprime ensuite de la même quantité. Ce sont les seuls efforts auxquels il soit soumis. La cage subit deux déplacements verticaux successifs, l'un constant et égal à l'allongement que le ressort à boudin doit prendre pour amener les griffes du parachute au contact des guides, l'autre variable avec la quantité dont ces griffes pénètrent dans les longrines, et par suite, avec l'intensité du choc qui se produit au moment de la rupture de la corde. Ces deux déplacements de la cage ont lieu lorsque les bras de l'appareil ont déjà leurs extrémités engagées sur les guides et ne peuvent plus que prendre autour de ces extrémités un mouvement de rotation d'une amplitude très-limitée. Le châssis supérieur en bois de la cage se rapproche donc des bras : il serait exposé, dans certains cas, à les rencontrer et à se briser sur eux. Aussi présente-t-il par-dessous, et à l'intérieur de chacune des coulisses de la traverse RS, des entailles dont le fond est indiqué en projection sur la *fig.* 4 par les lignes HT'. Ces entailles sont destinées à recevoir au besoin les bras du parachute lorsque le déplacement relatif de la cage est trop considérable.

On voit que l'appareil de M. Fontaine est extrêmement simple. Son action dépend surtout du jeu du ressort à boudin destiné à produire le mouvement relatif de la tige du crochet de la cage. Il est donc très-important de pouvoir visiter souvent et changer au besoin

le ressort. Le parachute est disposé de manière à rendre la surveillance très-facile. Il suffit, en effet, de chasser la clavette et de dévisser l'écrou C'. Le ressort se trouve démonté, et on peut vérifier, à l'aide d'un étalon, si ce ressort décomprimé reprend bien toute sa longueur de $0^m,195$.

Le parachute n'a pas un poids considérable et ajoute peu à la charge que les câbles doivent supporter. Les pièces qui le composent essentiellement pèsent ensemble $90^k,60$, savoir :

	kil.
Crochet d'attelage, écroux vissés sur sa tige. .	24,00
Chape sur laquelle sont assemblés les deux bras du parachute.	21,00
Ces deux bras.	33,10
Traverse à coulisses..	11,00
Ressort à boudin et ses deux boîtes.	1,50
	90,60

On devrait, peut-être, ajouter à ces $90^k,60$ la charge due à la traverse supérieure de la cage, au châssis en bois et aux barres de fer qui relient ce châssis à la traverse de manière à constituer une couverture suffisamment solide. Cette charge ne doit cependant pas être intégralement considérée comme une augmentation du poids mort due à l'application du parachute. Si, effectivement, on employait des cages d'extraction sans parachute, il faudrait toujours que ces cages fussent pourvues de chapeaux; et, pour suspendre chacune d'elles au crochet de son câble, on devrait faire usage d'un attirail en fer dont le poids ne laisserait pas d'être assez élevé.

La construction de l'appareil est d'ailleurs facile et n'exige un ajustage un peu soigné que pour les attaches des deux bras destinés à pénétrer dans les guides.

Le parachute est en un mot bien combiné; ses éléments principaux, ceux qui, en cas de rupture de la corde, doivent résister au choc produit, présentent une très-grande force; son chapeau est aussi très-solidement construit. Ce parachute paraît donc devoir remplir parfaitement son but.

Il serait déjà très-utile quand il ne servirait qu'à éviter, en cas d'accident, la destruction du matériel d'extraction. Il pourrait alors être appliqué dans toute fosse garnie de guides en bois, quel que fût le système de ce matériel. On compred très-bien, en effet, et il nous suffit de l'indiquer, qu'on peut suspendre au châssis supérieur *ab*, dépendant du parachute, une benne de forme quelconque.

Ce parachute a été soumis à trois expériences, dont nous allons faire connaître les résultats.

Première expérience.

La première a eu lieu le 21 février 1851. L'une des deux cages de la fosse Tinchon avait été attelée à un mauvais câble destiné à être coupé. Cette cage pesait 530 kil., la chaîne de lâche et le crochet à ressort de la corde étant compris dans ce poids. On a placé sur l'étage inférieur un wagon d'entretien pesant vide 130 kil., et contenant 5 hectolitres de charbon. La cage, disposée pour l'expérience, avait donc un poids total de 1.085 kil. Elle a été descendue à la profondeur de 245 mètres et arrêtée en face d'un accrochage, dans lequel nous nous sommes placé.

Le câble a été alors coupé au niveau de l'orifice du puits. Aussitôt après sa rupture, la charge a été instantanément arrêtée sur les guides. Le choc a été très-violent, mais la cage n'a parcouru, dans le sens vertical, qu'une très-petite hauteur, et une lampe placée dans l'intérieur est restée allumée.

Le crochet du câble a brisé le ressort du crochet de

la cage et a pu par conséquent se dégager. Néanmoins, la corde n'est pas tombée au fond du puits et s'est amoncelée sur le chapeau de la cage. Son extrémité la plus rapprochée de la section de rupture pendait de 25 mètres en-dessous de celle-ci. Déduction faite de la longueur occupée par sa chaîne de lâche et son crochet, le câble avait dans le puits un développement d'environ 243 mètres. A 4 kil. par mètre courant, il pesait donc 972 kil. Ce poids, s'étant ajouté à celui de la cage et de son contenu, c'est en tout une charge de 2.057 kil., qui est restée suspendue sur les guides.

Une seule des deux griffes du parachute a mordu : elle a pénétré de 35 millimètres. Ce résultat, l'action efficace d'une seule griffe, ne peut s'expliquer que par un défaut de symétrie dans la position de la cage, par rapport à ses deux guides. Ceux-ci, au lieu d'avoir l'écartement normal de $1^m,20$, se trouvaient, au point où l'expérience a été faite, à une distance de $1^m,215$. La longueur de la traverse supérieure, longueur mesurée entre les surfaces des fourches destinées à glisser à la partie antérieure des longrines, est de $1^m,190$. La cage pouvait donc être plus rapprochée de l'un des guides que de l'autre, et la différence s'élever jusqu'à $0^m,025$. Lorsque, après la rupture du câble, le ressort à boudin a exercé son action, il s'est allongé jusqu'au moment où la griffe et le guide, le plus rapprochés l'un de l'autre, ont été amenés au contact. Son jeu s'est alors trouvé arrêté, et, comme pour une même extension de ce ressort, les deux griffes doivent nécessairement se déplacer dans le sens horizontal de la même quantité, si l'une d'elles, celle qui avait le moindre parcours à faire, était arrivée sur le guide avec lequel elle était en rapport, l'autre n'avait évidemment pas pu s'engager de la même manière ; elle était restée libre

comme avant la rupture de la corde. Les choses étant en cet état, et la cage tombant d'une hauteur égale à l'allongement du ressort à boudin, le choc a fait pénétrer profondément la griffe, déjà plus ou moins enfoncée, et en même temps, tout le système a pris, autour du seul point de suspension ainsi déterminé, un mouvement de rotation qui n'a été limité que par la résistance des guides. La cage s'est donc placée obliquement par rapport à l'axe vertical du puits ; elle est restée accrochée par un seul des deux bras du parachute, et maintenue par la pression exercée sur ses guides, pression telle que l'écartement de ces guides, à la hauteur des griffes, a été porté de $1^m,215$ à $1^m,24$.

Le chapeau de la cage a parfaitement résisté au choc de la corde; il n'a été nullement endommagé par la charge qu'il a eu à supporter. Quant à la cage elle-même, elle a éprouvé une avarie de peu d'importance, due à la position oblique qu'elle a prise dans le puits. Son châssis supérieur en bois a porté, par le fond de l'une des entailles H'I' dont nous avons parlé, sur le bras du parachute enfoncé dans l'un des guides. Ce châssis, qui n'était pas consolidé par-dessus, a éprouvé un commencement de rupture. On a pris immédiatement une disposition qui évitera le retour d'un accident semblable. On a rempli, par des madriers de forme appropriée, les vides triangulaires existant dans le chapeau de la cage, au-dessus de chacun des petits côtés du châssis, entre ces petits côtés, les armatures en fer et la traverse supérieure KL. Entre cette traverse et les madriers, on a serré des coins de manière à rendre la traverse et le châssis solidaires l'un de l'autre. Ce châssis est par suite susceptible d'une beaucoup plus grande résistance.

En résumé, dans la première expérience, les prévi-

sions de M. Fontaine n'ont pas été réalisées au sujet du câble d'extraction. Ce câble est resté sur la cage au lieu de tomber au fond du puits. Le parachute a, du reste, bien fonctionné : il a déterminé, immédiatement après la rupture de la corde, l'arrêt brusque sur les guides d'un poids de 1.085 kilogrammes, et a maintenu dans le puits, malgré les chocs qu'il a éprouvés, une charge totale de 2.057 kilogrammes. Son action n'a pas été régulière, mais elle n'en est peut-être que plus concluante. Le résultat observé à ce sujet provient d'ailleurs de causes complétement étrangères à l'appareil lui-même. Ces causes sont effectivement inhérentes, soit à l'installation relative des deux guides, soit à leur établissement par rapport à la molette placée au-dessus du puits, la tangente verticale à cette molette, c'est-à-dire la direction du câble, se trouvant plus ou moins exactement dans l'axe du système qu'ils constituent; soit encore à la manière dont la charge était répartie dans la cage, par rapport à son centre de figure. L'opération à laquelle on a procédé pour couper la corde à l'orifice de la fosse peut enfin avoir exercé une certaine influence sur le fait qui s'est produit (1).

Deuxième expérience.

La seconde expérience a été faite le même jour que la première. La cage a été chargée de la même manière. Son poids total, jusqu'à la corde, était par conséquent encore de 1.085 kilogrammes. Elle a été des-

---

(1) Le câble étant en effet tendu dans le puits par la charge de 1.085 kil. suspendue à son extrémité et arrêtée devant l'accrochage de 245 mètres, on a appliqué contre lui un sommier reposant sur le sol. C'est sur ce sommier que le câble a été coupé à coups de hache. En opérant ainsi, en exerçant d'abord contre ce câble une certaine pression, on l'a très-probablement écarté de sa direction naturelle et rapproché de l'un des guides. C'est précisément sur ce guide que la cage est restée suspendue.

cendue à la profondeur de 330 mètres, et arrêtée à cette profondeur en un point où l'écartement des deux guides se trouvait être de $0^m,217$. Le câble a éte alors coupé au niveau de l'orifice du puits.

La charge n'est tombée verticalement que de 45 millimètres; elle est restée suspendue sur les deux bras du parachute.

Le ressort en acier du crochet n'a pas été brisé, mais il a cédé de manière à laisser sortir le crochet de la corde. Cette corde est restée en un seul morceau sur la longueur d'environ 328 mètres qui était développée dans la fosse; elle s'est encore enroulée sur elle-même de manière à rester sur la cage. Il en pendait seulement en dessous un bout de 140 mètres. Le poids des 328 mètres de câble était de 1.312 kil. Ce poids s'étant ajouté, comme tout à l'heure, à celui de la cage, la charge retenue sur les guides était en totalité de 2.397 kil.

Les deux griffes ont pénétré dans les longrines, mais inégalement : l'une d'elles est entrée de $0^m,020$, l'autre de $0^m,016$. Ces griffes ont mordu à $0^m,85$ au-dessous d'un bois d'entre-fend. Les deux guides étaient beaucoup moins écartés l'un de l'autre que dans la première expérience, c'est-à-dire de $1^m,22$ seulement.

Le chapeau de la cage et cette cage elle-même n'ont éprouvé aucun accident.

La seconde expérience a donc parfaitement réussi; seulement la corde, bien que devenue indépendante, est encore restée sur la cage.

Dans ces deux épreuves, la cage était au repos au moment de la rupture du câble; elle se trouvait donc dans des conditions exceptionnelles, et les résultats constatés n'étaient pas aussi concluants qu'on pouvait le désirer. Une nouvelle expérience, plus rapprochée des conditions de la pratique, a été faite le 21 mars 1851. Troisième expérience.

Pour se placer dans des circonstaces défavorables, on a mis dans la cage deux wagons contenant chacun 5 hectolitres de charbon. Le poids de cette cage a été ainsi porté à 1.640 kilogrammes. On s'est en outre arrangé pour faire rompre le câble pendant le mouvement descendant dans le puits; le parachute devait ainsi arrêter la cage animée d'une certaine vitesse; enfin on a déterminé la rupture quand la cage se trouvait à une grande profondeur, afin qu'elle eût à supporter le choc d'un poids considérable de la corde.

Pour réaliser ces conditions, on a coupé en partie le câble sur sa bobine en un point tel que, au moment où ce point se détacherait du noyau encore enroulé, la cage fût parvenue à la profondeur de 365 mètres. La machine à vapeur donnait 18 coups par minute. L'engrenage monté sur l'axe de la manivelle et celui transmettant le mouvement aux bobines ayant des diamètres dans le rapport de 2 à 3, l'axe des bobines faisait 12 tours par minute, ou 0,2 tours par seconde. Ainsi, au moment de la rupture du câble, la longueur de ce câble débobinée par seconde, et par suite la vitesse de la cage dans le puits, devaient être de $0,2 \times 6^{m},28$ ou de $1^{m},256$. La corde plate, fortement entamée, a cédé sous la charge, et les choses se sont passées telles qu'elles avaient été préparées. Le parachute a très-bien produit son effet : la cage a été arrêtée sur les guides à la profondeur de 365 mètres.

Comme dans la seconde expérience, le ressort en acier du crochet d'attelage s'est ouvert de manière à laisser dégager le crochet de la corde. Celle-ci, par l'effet des chocs, a été coupée en trois morceaux qui se sont enchevêtrés les uns dans les autres et sont encore restés amoncelés sur la cage. La longueur de câble qui est ainsi venue augmenter la charge supportée

par les deux bras du parachute comprenait non-seulement la partie, longue d'environ 363 mètres, qui pendait dans le puits, mais en outre celle débobinée depuis l'orifice de ce puits jusqu'à la section du rupture sur ce tambour. Les molettes ayant une élévation de 12 mètres au-dessus du sol du bâtiment, cette dernière partie était d'environ 30 mètres. Le poids ajouté sur la cage est donc celui de 393 mètres. Ce poids, de 1.592 kil., a élevé la charge totale à 3.212 kil.

Les deux griffes ont pénétré dans ces guides, l'une de $0^m,048$, l'autre de $0^m,038$. Elles se sont enfoncées presqu'exactement en face d'un bois d'entre-fend. Aussi, malgré la violence du choc, l'écartement des guides n'a été augmenté que de $1^m.212$ à $1^m.220$.

Aucune avarie n'a été observée sur la cage ou sur son chapeau. Cette cage n'a pas été exactement arrêtée dans le puits au moment où les griffes du parachute ont rencontré pour la première fois les guides. Les dents qui terminent ces griffes ont labouré la surface antérieure des longrines sur $0^m,01$ de hauteur : elles ont laissé des empreintes verticales dont la profondeur augmente à mesure qu'elles s'éloignent de leur point de départ.

Enfin les deux bras de l'appareil se sont trouvés, au moment où ils ont obéi à l'action du ressort à boudin, dans une direction un peu oblique par rapport au plan vertical passant par les axes des deux guides, et l'un de ces guides, le plus profondément entamé, a été pénétré à l'aplomb d'une de ses faces latérales dont un éclat a été arraché. C'est-là le seul accident qu'ait éprouvé le système.

Les trois expériences faites sur le parachute de M. Fontaine sont certainement très-satisfaisantes. En ce qui concerne la corde, les prévisions de l'inventeur

ne se sont pas justifiées; mais nous ne pensons pas que ce soit là un fait regrettable. Dès qu'il est constaté que le câble, en tombant d'une hauteur considérable, ne cause aucun préjudice à l'appareil, peu importe qu'il reste sur le chapeau. Si, au contraire, une fois la charge arrêtée sur les guides, il continuait son mouvement descendant vers le fond du puits, le fouettement latéral pourrait peut-être briser les parois de la cage et déterminer des accidents.

Il est actuellement permis de conclure que le parachute de M. Fontaine est propre à prévenir les sinistres dûs à la rupture des cordes. Il est malheureusement soumis à des chocs brusques et très-énergiques qui tendent à désorganiser non-seulement l'appareil lui-même mais encore les guides sur lesquels la charge reste appliquée. Toutefois, dans les expériences précitées, et notamment dans la dernière, cet appareil a parfaitement supporté des efforts bien plus considérables que ceux auxquels il peut être exposé quand on descend ou quand on remonte des hommes dans les cages d'extraction. Il est donc établi avec assez de solidité pour qu'on puisse compter sur son action. Le chapeau qui le recouvre est lui-même susceptible de protéger complétement les mineurs placés sous son abri. On ne saurait néanmoins se prononcer plus explicitement sur son efficacité complète, tant qu'il n'aura été éprouvé qu'avec des matériaux inertes. Si le câble venait à rompre dans un moment où la cage d'extraction contient des hommes, ces hommes resteraient bien suspendus sur les guides; il seraient soustraits, c'est déjà un fait énorme, à la mort qu'ils eussent infailliblement trouvée au fond du puits. Mais, cet appareil ferait naître un autre danger et entraînerait peut-être de graves accidents. Les hommes

éprouveraient en effet un choc très-violent dont il serait difficile d'apprécier les conséquences (1).

Le parachute de M. Fontaine doit à son mode de construction un avantage particulier que nous devons signaler. Il permet aux mineurs placés dans la cage qui descend de s'arrêter à volonté dans le puits. Ils n'ont pour cela qu'à soulever à la main les deux griffes de l'appareil et à les amener au contact des guides.

L'expérience en a été faite plusieurs fois (2). Cette

(1) Le parachute de M. Fontaine ne doit donc être regardé que comme un simple palliatif, et nullement comme un appareil d'une efficacité absolue. Suivant la remarque de M. l'inspecteur général Combes, il constituerait un danger plutôt qu'une garantie s'il inspirait une confiance exagérée, et si l'étroite surveillance dont les câbles doivent constamment être l'objet venait à se relâcher. C.

(2) Dans l'une de ces expériences, nous nous trouvions dans la cage avec le directeur et deux maîtres-porions de l'établissement de Saint-Vast. Une fois cette cage arrêtée sur les guides par notre fait, à la profondeur d'environ 350 mètres, la machine à vapeur continuant à dérouler le câble d'extraction dans le puits, le crochet de ce câble est sorti de celui de la cage en faisant plier le ressort qui ferme ce dernier. Nous sommes, par conséquent, restés suspendus au milieu de la fosse, sur les deux bras du parachute, jusqu'à ce qu'un mineur ait pu, en se laissant glisser le long d'un des guides en bois, venir raccrocher la corde. Cette circonstance est jusqu'ici la seule où l'appareil de M. Fontaine ait agi pendant que des hommes se trouvaient dans la cage. Mais il n'y avait pas eu choc au moment où les griffes se sont enfoncées dans les guides.

La facilité avec laquelle le crochet de la corde s'est dégagé de celui de la cage, la fréquence du même fait chaque fois que cette cage reposait sur des appuis fixes, soit à l'accrochage du fond, soit à la recette du jour, et que, par suite, le câble prenait du lâche, ont déterminé M. Fontaine à renoncer aux dispositions qu'il avait d'abord adoptées, et qui n'avaient pas, d'ailleurs, rempli leur but. Aujourd'hui, le crochet de la corde est engagé sur celui de la cage, et, par conséquent, cette corde, en cas de rupture, restera nécessairement sur le chapeau destiné à garantir les ouvriers.

facilité pourrait être quelquefois très-précieuse, dans le cas par exemple où le mécanicien n'interromprait pas à temps la marche du moteur et conduirait la cage jusqu'au puisard dans lequel se réunissent les eaux de la mine.

MÉMOIRE

SUR LES RESSORTS EN ACIER EMPLOYÉS DANS LE MATÉRIEL DES CHEMINS DE FER (1).

Par M. PHILLIPS, ingénieur des mines.

CHAPITRE PREMIER.

THÉORIE MATHÉMATIQUE DES RESSORTS.

Les ressorts sont d'un usage général dans le matériel roulant des chemins de fer et dans les véhicules qui circulent sur les routes ordinaires. Jusqu'ici, malheureusement, on n'a pas déterminé, d'une manière générale, les lois auxquelles ces appareils, quelle que soit leur forme, obéissent, et l'on a dû, en général, recourir aux tâtonnements pour fixer les formes et les dimensions qui conviennent aux ressorts, dans les différents cas que la pratique peut présenter. Il m'a donc semblé

(1) Ce travail, présenté à l'Académie des sciences, a été renvoyé à l'examen d'une commission composé de MM. Poncelet, Séguier et Combes, rapporteur. Nous reproduisons les conclusions du rapport adopté par l'Académie dans sa séance du 16 février dernier; elles donneront aux constructeurs la mesure de la confiance que doivent inspirer l'analyse de M. Phillips, et les conséquences pratiques qu'il en a déduites. C.

« Le travail de M. Phillips sera fort utile aux ingénieurs et » aux constructeurs qui y trouveront des règles rationnelles » et d'une application facile pour l'établissement des ressorts » capables de satisfaire avec la moindre dépense de matière à » des conditions données de flexibilité et de résistance. Les » publications antérieures qui sont parvenues à notre con- » naissance n'ont traité que les cas les plus simples de la » théorie des ressorts. Nous citerons en particulier un mé- » moire intéressant de M. Blacher, imprimé dans le *Compte* » *rendu* de la Société des ingénieurs civils (2e trimestre 1850), » où l'auteur a appliqué le calcul aux ressorts composés de » feuilles d'égale épaisseur. La théorie donnée par M. Phillips

qu'il y avait un intérêt assez grand à combler cette lacune, et c'est en me rattachant aux principes fondamentaux de la résistance des matériaux que j'ai établi la théorie suivante des ressorts. Les résultats qu'elle donne ont été vérifiés dans les cas les plus divers, par des expériences directes, avec un degré de précision extrême, auquel j'étais loin de m'attendre moi-même, et qui paraît indiquer, de la part de l'acier, un état d'élasticité bien plus parfait que dans le fer ou dans la fonte.

Un ressort présente toujours deux qualités qui dominent toutes les autres et qui lui sont demandées à des degrés très-divers suivant les différents cas.

Le première est la flexibilité, c'est-à-dire la flexion ou diminution de flèche que le ressort éprouve sous un effort déterminé. La roideur est la propriété inverse.

La seconde est la résistance propre du ressort, c'est-à-dire la plus grande charge ou le plus grand choc que celui-ci puisse supporter sans que son élasticité soit altérée.

» embrasse tous les cas possibles. Les règles de construction » applicables aux ressorts à feuilles d'épaisseurs croissantes et » aux ressorts à *auxiliaires* méritent, en particulier, de fixer » l'attention des géomètres; les expériences sur la flexion » transversale de l'acier intéressent à la fois les physiciens et » les ingénieurs. Votre commission pense qu'à ces divers titres » le mémoire de M. Phillips est digne de figurer dans la collection des *Savants étrangers*, et a l'honneur de vous pro» poser d'en ordonner l'insertion dans ce recueil. »

Note de M. Combes.

Les formules principales dont M. Blacher fait usage dans son mémoire et qu'il déclare tenir de M. Schinz sont dues à notre collègue M. Clapeyron, qui les avait données à M. Schinz pour calculer les dimensions des ressorts de voitures du chemin de fer de Saint-Germain. J'ai été informé de ce fait après la lecture de mon rapport à l'Académie des sciences. Je m'empresse de réparer ici cette omission qu'il m'était impossible d'éviter, parce que M. Clapeyron n'a pas publié ses recherches.

Les ressorts sont reliés aux châssis des voitures, wagons et machines, de différentes manières. Je ne me suis pas occupé de ces différents supports ; j'ai étudié le ressort considéré isolément et indépendamment de la manière dont les efforts qu'il a à supporter lui sont transmis.

Avant d'exposer la théorie des ressorts, je vais encore rappeler succinctement les conditions d'équilibre d'une barre prismatique encastrée par une de ses extrémités A, et chargée à l'autre B, d'un poids donné Q (Pl. IV, *fig.* 1). Par l'effet de la charge, la barre est infléchie. Les fibres qui sont vers la face convexe sont allongées ; celles qui sont vers la face concave sont raccourcies. Pour avoir l'état des fibres dans une section verticale quelconque ab, on transporte la force Q parallèlement à elle-même jusqu'en ab; il en résulte une force et un couple : la force peut être négligée, car, étant sensiblement perpendiculaire aux fibres, elle ne peut ni les allonger ni les raccourcir ; reste donc le couple (Q, —Q) qui doit faire équilibre aux forces attractives et répulsives qui agissent dans cette section. Donc déjà ces attractions et répulsions mutuelles doivent se réduire à un couple. On part de là pour démontrer que l'axe neutre, c'est-à-dire la fibre qui n'est ni allongée ni raccourcie, et qui sépare celles qui sont allongées de celles qui sont raccourcies, passe par le centre de gravité de la section ab, de sorte que, si la section est rectangulaire, l'axe neutre passe par le milieu de l'épaisseur de la barre. Quant au moment du couple formé par les actions attractives et répulsives qui s'exercent de part et d'autre de la section ab, on fait voir que sa valeur est égale à $\frac{M}{\rho}$, où ρ désigne le rayon de courbure de l'axe neutre dans la section ab, et M le moment d'élasticité de cette section. Le moment d'élasticité, en général,

dépend des dimensions de la section à laquelle il se rapporte, ainsi que du coefficient d'élasticité. Pour une section rectangulaire, sa valeur est $\frac{Eae^3}{12}$, E représentant le coefficient d'élasticité, a la dimension de la section perpendiculaire à la force, et e la dimension parallèle à cette force. En posant $AB = L$, et $Ab = \lambda$, on a donc $\frac{M}{\rho} = Q(L - \lambda)$. On tire de cette équation la flèche F produite par la charge Q. On trouve $F = \frac{QL^3}{3M}$.

On obtient aussi la valeur de l'allongement ou du raccourcissement proportionnel α, en un point quelconque de la section ab, celui, par exemple, qui serait à une distance v de l'axe neutre. On a alors :

$$\alpha = \frac{v}{\rho}, \quad \text{ou} \quad \alpha = \frac{vQ(L-\lambda)}{M}.$$

Si la barre, au lieu d'être tout à fait droite en fabrication, avait une courbure initiale, on aurait exactement de même, en appelant r le rayon de courbure initial de l'axe neutre, à la section ab ;

$$M\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho}\right) = Q(L-\lambda),$$

au lieu de

$$\frac{M}{\rho} = Q(L-\lambda) \quad \text{et} \quad \alpha = v\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho}\right),$$

au lieu de

$$\alpha = \frac{v}{\rho}.$$

Je passe maintenant à la théorie des ressorts.

Préliminaires. Soit $LL_1L_2L_3L_4$... (*fig.* 2) un ressort composé d'un nombre quelconque de feuilles étagées entre elles comme on voudra. Je désigne par L, L_1, L_2, L_3, L_4, etc., les demi-longueurs de ces feuilles ; par r, r_1, r_2, r_3, r_4, etc., leurs rayons de courbure de fabrication, rayons qui peuvent

être variables d'un point à l'autre d'une même feuille, et par M, M_1, M_2, etc., leurs moments d'élasticité, qui peuvent aussi varier dans une même feuille.

J'admettrai qu'une feuille de ressort se comporte comme une lame prismatique ; c'est-à-dire qu'au milieu de son épaisseur se trouve un cylindre qui serait le lieu géométrique des fibres neutres, lesquelles ne seraient ni allongées ni raccourcies par un effort transversal tendant à faire fléchir la lame, et par rapport auquel les fibres qui sont d'un côté seraient allongées, et celles de l'autre raccourcies ; de plus, que les allongements et accourcissements se font sans que les fibres glissent les unes sur les autres, de telle sorte que deux molécules, qui étaient d'abord sur un même rayon de courbure, continuent à y rester. Cela posé, il est facile de trouver l'expression analytique de l'allongement ou du raccourcissement proportionnel en un point quelconque. En effet, soient ab et $a'b'$ (*fig.* 3) deux éléments dont les extrémités se trouvent respectivement sur un même rayon de courbure $Oa = Ob = r$, et soit la distance $aa' = v$.

La *fig.* oo fait voir que l'on a $a'b' = ab \dfrac{r+v}{r}$.

Si la feuille est soumise à un effort transversal tel que $a'b'$ deviennent $a''b''$, et que le rayon de courbure devienne ρ au lieu de r; si ab est sur l'axe neutre, il n'aura pas changé de longueur et l'on aura $a''b'' = ab \dfrac{\rho+v}{\rho}$.

Si donc on désigne par α l'allongement ou le raccourcissement proportionnel $\dfrac{a''b''-a'b'}{a'b'}$, on voit que

$$\alpha = \frac{v\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{r}\right)}{1 + \frac{v}{r}}$$

ou, comme $\frac{v}{r}$ est très-petit et négligeable devant l'unité,

$$\alpha = v\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{r}\right) \quad \text{ou} \quad \alpha = v\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho}\right),$$

selon qu'il y a raccourcissement ou allongement.

Calcul du rayon de courbure en un point quelconque d'un ressort sous charge.

On peut maintenant trouver la manière dont varie le rayon de courbure, pour chaque point d'une feuille quelconque, sous l'action d'un poids donné Q, appliqué à chacune des extrémités d'un ressort.

Considérons d'abord la partie LL_1 (*fig.* 2) de la maîtresse feuille au delà de la seconde. Le moment de la force Q, par rapport à une section quelconque, devant être égal à la somme des moments, par rapport à l'axe neutre, des forces attractives et répulsives qui s'exercent de part et d'autre de cette section, on aura, en désignant par λ la longueur comprise entre le milieu de la feuille et la section considérée

$$Q(L - \lambda) = M\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho}\right),$$

d'où l'on tire, en faisant, pour abréger, $\frac{M}{r} - QL = B$,

$$(1) \qquad \frac{1}{\rho} = \frac{B + Q\lambda}{M},$$

formule qui donne le rayon de courbure pour tous les points de la partie LL_1 de la maîtresse feuille. Pour les autres points de cette feuille, où elle est soutenue par celles qui sont au-dessous, les formules ne sont plus les mêmes, et il faut tenir compte des pressions réciproques exercées par les diverses feuilles les unes contre les autres. Je supposerai d'ailleurs que celles-ci ne baillent pas, c'est-à-dire qu'elles soient, en tous leurs points, appliquées exactement les unes contre les autres. Plus loin, j'établirai les conditions générales qui doivent être remplies pour qu'il en soit ainsi.

Cela posé, je considère la partie de la première

feuille comprise entre les longueurs L_1 et L_2 et situé au-dessus de L_1L_2. Pour une section quelconque, comprise dans cet intervalle, la somme des moments par rapport à l'axe neutre, des attractions et répulsions mutuelles, de part et d'autre de cette section, est égale au moment de la force Q, moins la somme des moments des pressions exercées en sens inverse par la partie de L_1L_2 comprise entre le point L_1 et la section que l'on considère. Si λ est la longueur de la première feuille depuis cette section jusqu'au milieu du ressort; si l est la longueur analogue pour une section comprise entre λ et L_1; si p est la pression rapportée à l'unité de longueur qui a lieu entre la première et la deuxième feuilles, à la section répondant à l, on aura :

$$M\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho}\right)=Q(L-\lambda)-\int_{\lambda}^{L_1} p(l-\lambda)dl.$$

Si ε est, pour la section répondant à λ, l'écartement des axes neutres de la première et de la deuxième feuilles, un raisonnement tout à fait semblable montre qu'on aura, pour la partie L_1L_2 de celle-ci,

$$M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{\rho+\varepsilon}\right)=\int_{\lambda}^{L_1} p(l-\lambda)dl.$$

En ajoutant ces deux dernières équations, les intégrales se détruisent et on a simplement :

$$M\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho}\right)+M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{\rho+\varepsilon}\right)=Q(L-\lambda).$$

Or, ε est assez petit pour qu'on puisse le négliger devant ρ; on peut donc remplacer $\frac{1}{\rho+\varepsilon}$ par $\frac{1}{\rho}$, et alors l'équation ci-dessus donne, en faisant, pour abréger $\frac{M}{r}+\frac{M_1}{r_1}-QL=B_1$,

$$\frac{1}{\rho}=\frac{B_1+Q\lambda}{M+M_1}, \tag{2}$$

formule tout à fait semblable, pour la forme, à l'expression (1).

On aura, exactement de même, la valeur du rayon de courbure de la première feuille, entre les limites L_2 et L_1. Ainsi, conservons les mêmes notations que précédemment; puis désignons par p_1 la pression mutuelle rapportée à l'unité de longueur, entre la deuxième et la troisième feuilles, et par ε_1 la distance entre les axes neutres de la première et de la troisième feuilles. On aura successivement :

$$M\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho}\right)=Q(L-\lambda)-\int_{\lambda}^{L_1}p(l-\lambda)\,dl.$$

$$M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{\rho+\varepsilon}\right)=\int_{\lambda}^{L_1}p(l-\lambda)\,dl-\int_{\lambda}^{L_2}p_1(l-\lambda)\,dl.$$

$$M_2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{\rho+\varepsilon_1}\right)=\int_{\lambda}^{L_2}p_1(l-\lambda)\,dl.$$

Ajoutant ces trois équations membre à membre, les intégrales se détruisent entre elles et il reste :

$$M\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho}\right)+M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{\rho+\varepsilon}\right)+M_2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{\rho+\varepsilon_1}\right)=Q(L-\lambda)$$

Négligeons encore dans cette équation ε et ε_1 devant ρ, et posons pour abréger :

$$\frac{M}{r}+\frac{M_1}{r_1}+\frac{M_2}{r_2}-QL=B_2;$$

il vient :

$$\frac{1}{\rho}=\frac{B_2+Q\lambda}{M+M_1+M_2}. \tag{3}$$

On voit aisément que cette marche est uniforme et donne toujours des résultats analogues. Ainsi, en faisant :

$$\frac{M}{r}+\frac{M_1}{r_1}+\frac{M_2}{r_2}+\frac{M_3}{r_3}-QL=B_3,$$

on a :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{B_3 + Q\lambda}{M + M_1 + M_2 + M_3} \qquad (4)$$

pour le rayon de courbure de la première feuille entre L_3 et L_4 et ainsi de suite.

En résumé, pour le premier étage de la maîtresse feuille entre L_1 et L_2, on a :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{M}{r} - QL + Q\lambda}{M}.$$

Pour l'étage suivant, de L_1 à L_2, on a :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{M}{r} + \frac{M_1}{r_1} - QL + Q\lambda}{M + M_1}.$$

Pour l'étage suivant, de L_2 à L_3, on a :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{M}{r} + \frac{M_1}{r_1} + \frac{M_2}{r_2} - QL + Q\lambda}{M + M_1 + M_2},$$

et ainsi de suite. De cette manière on a, sous une charge connue, la valeur du rayon de courbure en un point quelconque de toutes les feuilles du ressort.

Ces expressions générales conduisent à quelques remarques. Ainsi, si pour chaque feuille la largeur, l'épaisseur et le rayon de courbure ne varient pas d'un point à un autre, les formules précédentes font voir que ρ varie en sens inverse de λ; c'est-à-dire que dans un même intervalle d'une même feuille, soit de L à L_1, soit de L_1 à L_2, ou de L_2 à L_3, etc., le rayon de courbure sous charge va en augmentant, lorsqu'on se rapproche du milieu du ressort. Ce n'est pas tout : ce rayon, après avoir augmenté, va brusquement en diminuant au moment où l'on passe d'un intervalle au

suivant. Ainsi, faisons dans les formules (1) et (2) $\lambda = L_1$, et soient ρ_0 et ρ_1 les valeurs correspondantes du rayon de courbure ; on aura, en remplaçant B et B_1 par leurs valeurs :

$$\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_0} = \frac{M_1}{M(M + M_1)} \left[M \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r} \right) + Q(L - L_1) \right].$$

Or, en général, r_1 n'est pas supérieur à r; donc :

$$\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_0} > 0 \qquad \text{et} \qquad \rho_1 < \rho_0.$$

Ainsi la courbure change brusquement à l'instant où l'on passe du premier intervalle au second. L'expression précédente fait voir qu'on atténue cet effet en faisant, en ce point, M_1 très-petit par rapport à M, c'est-à-dire en aiguisant la seconde feuille ou réduisant son épaisseur en ce point. Du second au troisième intervalle le raisonnement est semblable. En appelant ρ_2 et ρ_3 les rayons de courbure donnés par (2) et (3) pour $\lambda = L_2$, on trouve :

$$\frac{1}{\rho_3} - \frac{1}{\rho_2} = \frac{M_2}{(M + M_1)(M + M_1 + M_2)} \left[M \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r} \right) + \right.$$
$$\left. + M_1 \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) + Q(L - L_2) \right].$$

On voit encore que, comme r_2 n'est ordinairement supérieur ni à r_1 ni à r, $\frac{1}{\rho_3} > \frac{1}{\rho_2}$ et $\rho_3 < \rho_2$; on reconnaît ainsi que le moyen d'atténuer cet effet est d'amincir la troisième feuille à son extrémité. Le même raisonnement se continue pour toute l'étendue de la maîtresse feuille, et on vérifie ainsi l'utilité de ce fait pratique que tous les bons ressorts ont les extrémités de leurs feuilles aiguisées et amincies.

Expression des allongements et raccourcissements proportionnels

Les rayons de courbure étant obtenus, il est très-facile d'avoir les expressions des allongements et raccourcissements proportionnels qui ont lieu en des points

quelconques des feuilles. Ainsi, en désignant par α l'allongement ou le raccourcissement, on a : $\alpha = v\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho}\right)$ ou $\alpha = v\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{r}\right)$, comme cela a déjà été vu. Le maximum de α répond à celui de v, qui est égal à la demi-épaisseur de la feuille, pour la section que l'on considère, et, quant à ρ, sa valeur sera connue d'après les formules précédentes. Pour les autres feuilles que la première, on aurait :

en un point quelconque d'un ressort sous charge.

$$\alpha = v_1\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{\rho + \varepsilon}\right);\quad \alpha = v_2\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{\rho + \varepsilon_1}\right), \text{ etc.}$$

On voit par là que si l'épaisseur et le rayon de fabrication sont constants pour une même feuille, l'allongement ou le raccourcissement qui est un maximum à la surface, va en croissant, dans chaque étage, à mesure qu'on s'approche du milieu du ressort. On saura ainsi quels sont les allongements ou raccourcissements maxima, et l'on pourra reconnaître s'ils sont trop forts.

Épure servant à déterminer la forme exacte d'un ressort quelconque sous charge.

Les notions précédentes seraient déjà suffisantes pour se guider dans le choix des dispositions à adopter pour établir un bon ressort dans des conditions données. Ainsi, après avoir fixé de la manière paraissant la plus convenable les éléments d'un ressort, on ferait l'épure de son tracé, ou plutôt de celui de la maîtresse feuille sous charge. A cet effet, pour les différents étages de cette feuille, c'est-à-dire ceux qui répondent à LL_1, à L_1L_2, à L_2L_3, etc., on déterminerait les rayons de courbure sous charge, pour des points suffisamment rapprochés, par exemple, à $0^m,01$ ou $0^m,02$ les uns des autres. On chercherait aussi ceux qui ont lieu aux extrémités de chaque étage. Ces rayons de courbure s'obtiendraient à l'aide des formules (1), (2), (3), etc. Après avoir déterminé tous ces rayons de courbure,

on tracerait la courbe par éléments en supposant chacun de ceux-ci décrit avec un rayon égal à la moyenne entre ceux de ses deux extrémités. On aurait ainsi la nouvelle flèche, et, par suite, la flexion, et, en un mot, la forme générale du ressort sous charge, ainsi que l'allongement ou le raccourcissement en un point quelconque. Je présenterai plus loin des règles rigoureuses pour le calcul des ressorts, mais la méthode qui vient d'être exposée est quelquefois utile. Par exemple, avec certaines formes d'amincissement et des feuilles d'épaisseurs variables, les formules donnant la flexion seraient quelquefois très-compliquées, et il sera alors plus court de faire usage de l'épure.

Le coefficient d'élasticité qui a été adopté est le nombre 20.000.000.000, qui est généralement admis et indiqué par MM. Poncelet, Morin, et par la plupart des auteurs qui ont fait des expériences sur l'acier.

Toutes les épures que j'ai faites se sont accordées très-exactement avec les expériences qui ont été réellement faites sur les ressorts auxquels elles se rapportent. Ainsi voici quelques-uns de ces résultats :

NATURE DU RESSORT.	Charge d'épreuve.	PERTE de flèche	
		à l'épreuve réelle.	donnée par l'épure.
	kil.	mèt.	mèt.
Ressort à huit feuilles de wagon à marchandises du chemins de fer de Lyon.	2.000	0,057	0,058
Ressort à neuf feuilles de roue motrice de machine locomotive du chemin de fer de Tours à Nantes.	4.000	0,038	0,036
Ressort à huit feuilles de wagon de balast du chemin de fer de l'Ouest, construit d'après les règles qui seront exposées plus loin.	2,000	0,055	0,055
Idem.	4,500	0,125	0,125
Ressort à treize feuilles de voiture à voyageurs du chemin de fer de l'Ouest.	1.500	0,142	0,143

Remarque sur les allongements et les raccourcissements proportionnels.

Les expressions générales des allongements ou raccourcissements proportionnels conduisent à quelques remarques. Ainsi, en remplaçant $\frac{1}{\rho}$ par sa valeur, on a pour la maîtresse feuille, en appelant e son épaisseur, constante ou variable:

$$\alpha = \frac{e}{2}\frac{Q(L-\lambda)}{M}$$

dans l'intervalle LL_1;

$$\alpha = \frac{e}{2}\left[\frac{M_1\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{r_1}\right)+Q(L-\lambda)}{M+M_1}\right],$$

entre L_1 et L_2;

$$\alpha = \frac{e}{2}\left[\frac{M_1\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{r_1}\right)+M_2\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{r_2}\right)+Q(L-\lambda)}{M+M_1+M_2}\right],$$

entre L_2 et L_3 et ainsi de suite.

Dans toutes ces formules, α diminue à mesure que λ augmente, si chaque feuille a une épaisseur constante. Alors, dans chacun des intervalles considérés dans la maîtresse feuille, l'allongement augmente à mesure qu'en se rapproche du milieu du ressort.

Supposons que celui-ci n'ait pas de bande initiale; alors, dans une même section transversale, les rayons de fabrication sont tous égaux, et les formules ci-dessus deviennent :

$$\alpha = \frac{e}{2}\frac{Q(L-\lambda)}{M},$$

dans l'intervalle LL_1;

$$a = \frac{e}{2} \frac{Q(L - \lambda)}{M + M_1},$$

entre L_1 et L_2;

$$a = \frac{e}{2} \frac{Q(L - \lambda)}{M + M_1 + M_2},$$

entre L_2 et L_3, et ainsi de suite.

Ces formules étant indépendantes des rayons r, r_1, r_2, etc., on est conduit à cette conséquence remarquable que, quand les feuilles n'ont pas de bande de fabrication les unes par rapport aux autres, la nature de la courbe suivant laquelle elles sont formées et leur courbure initiale n'ont aucune influence sur les allongements et sur la résistance du ressort.

Expression analytique de la flèche et de la flexion d'un point quelconque d'un ressort sous charge.

Un élément important à déterminer, c'est la flèche d'un ressort sous charge. J'ai exposé plus haut comment, à l'aide d'une épure assez simple, on pouvait l'obtenir. Néanmoins il est nécessaire de déterminer son expression algébrique, afin de voir la manière dont elle est influencée par la construction du ressort, et aussi pour éviter des tâtonnements dans le cas où il s'agit d'établir un ressort dans des conditions données. Voici la valeur à laquelle je suis parvenu (*voir*, pour la démonstration, la note placée à la fin de cette notice) pour la flèche, sous la charge Q appliquée à chaque extrémité, en un point quelconque du ressort, ce point étant à une distance λ du centre du ressort, distance comptée suivant la maîtresse feuille, et $k + 1$ étant le rang de l'étage auquel appartient ce point, ce rang étant compté à partir du centre du ressort. Cette formule est la suivante :

$$(1)\qquad y = \frac{\frac{L^2_n}{2} \times M_n \left[M\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_n}\right) + M_1\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_n}\right) + \text{etc.} + M_{n-1}\left(\frac{1}{r_{n-1}} - \frac{1}{r_n}\right) - QL \right]}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_n)(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})} +$$

$$+ \frac{L^3_n}{3} \times \frac{M_n Q}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_n)(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})} +$$

$$+ \frac{L^2_{n-1}}{2} \times \frac{M_{n-1}\left[M\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_{n-1}}\right) + M_1\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_{n-1}}\right) + \text{etc.} + M_{n-2}\left(\frac{1}{r_{n-2}} - \frac{1}{r_{n-1}}\right) - QL \right]}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-2})} +$$

$$+ \frac{L^3_{n-1}}{3} \times \frac{M_{n-1} Q}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-2})} + \text{etc.} +$$

$$+ \frac{L^2_{n-k+1}}{2} \times \frac{M_{n-k+1}\left[M\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_{n-k+1}}\right) + M_1\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_{n-k+1}}\right) + \text{etc.} + M_{n-k}\left(\frac{1}{r_{n-k}} - \frac{1}{r_{n-k+1}}\right) - QL \right]}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k+1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k})} +$$

$$+ \frac{L^3_{n-k+1}}{3} \times \frac{M_{n-k+1} Q}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k+1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k})} +$$

$$+\left[\begin{array}{l} L_n \times \dfrac{M_n\left[QL - M\left(\dfrac{1}{r}-\dfrac{1}{r_n}\right) - M_1\left(\dfrac{1}{r_1}-\dfrac{1}{r_n}\right) - \text{etc.} - M_{n-1}\left(\dfrac{1}{r_{n-1}}-\dfrac{1}{r_n}\right)\right]}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_n)(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})} - \\ \qquad - \dfrac{L^2_n}{2} \times \dfrac{M_n Q}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_n)(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})} + \\ + L_{n-1} \times \dfrac{M_{n-1}\left[QL - M\left(\dfrac{1}{r}-\dfrac{1}{r_{n-1}}\right) - M_1\left(\dfrac{1}{r_1}-\dfrac{1}{r_{n-1}}\right) - \text{etc.} - M_{n-2}\left(\dfrac{1}{r_{n-2}}-\dfrac{1}{r_{n-1}}\right)\right]}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-2})} - \\ \qquad - \dfrac{L^2_{n-1}}{2} \times \dfrac{M_{n-1} Q}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-2})} + \text{etc.} + \\ + L_{n-k+1} \times \dfrac{M_{n-k+1}\left[QL - M\left(\dfrac{1}{r}-\dfrac{1}{r_{n-k+1}}\right) - \text{etc.} - M_{n-k}\left(\dfrac{1}{r_{n-k}}-\dfrac{1}{r_{n-k+1}}\right)\right]}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k+1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k})} - \\ \qquad - \dfrac{L^2_{n-k+1}}{2} \times \dfrac{M_{n-k+1} Q}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k+1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k})} \end{array}\right]\lambda +$$

$$+ \frac{\dfrac{M}{r} + \dfrac{M_1}{r_1} + \text{etc.} + \dfrac{M_{n-k}}{r_{n-k}} - QL}{2(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k})}\lambda^2 + \frac{Q}{6(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k})}\lambda^3.$$

Cette formule se simplifie beaucoup dans le cas où la courbure initiale de toutes les feuilles est la même; alors tous les termes qui contiennent comme facteur la différence des valeurs inverses des rayons disparaissent.

Cette formule donne aussi la flèche d'assemblage d'un ressort, quand les rayons de fabrication des diverses feuilles sont différents. Il suffit pour cela d'y faire $Q=o$, $K=n$, et $\lambda=L$. En même temps, les expressions (1), (2), (3), etc., font voir que la nouvelle figure de la maîtresse feuille se compose d'une série d'arcs de cercles se raccordant entre eux.

Dans tous les cas, il est facile d'obtenir, pour un point quelconque du ressort, la flexion ou la perte de flèche qui résulte d'une charge Q appliquée à chaque extrémité, Il suffit pour cela de retrancher l'expression ci-dessus de la valeur qu'elle prend lorsqu'on y fait $Q=o$; ce qui donne, en appelant i la flexion du point de la maîtresse feuille répondant à l'arc λ:

$$\text{(II)}\quad i=\frac{L^2_n}{2}\times\frac{M_nQL}{(M+M_1+\text{etc.}+M_n)(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-1})}-$$

$$-\frac{L^3_n}{3}\times\frac{M_nQ}{(M+M_1+\text{etc.}+M_n)(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-1})}+$$

$$+\frac{L^2_{n-1}}{2}\times\frac{M_{n-1}QL}{(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-1})(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-2})}-$$

$$-\frac{L^3_{n-1}}{3}\times\frac{M_{n-1}Q}{(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-1})(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-2})}+\text{etc.}+$$

$$+\frac{L^2_{n-k+1}}{2}\times\frac{M_{n-k+1}QL}{(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-k+1})(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-k})}-$$

$$-\frac{L^3_{n-k+1}}{3}\times\frac{M_{n-k+1}Q}{(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-k+1})(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-k})}+$$

$$+\Bigg[-L_n \times \frac{M_nQL}{(M+M_1+\text{etc.}+M_n)(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-1})}+$$

$$+\frac{L^2_n}{2}\times\frac{M_nQ}{(M+M_1+\text{etc.}+M_n)(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-1})}-$$

$$-L_{n-1}\times\frac{M_{n-1}QL}{(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-1})(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-2})}+$$

$$+\frac{L^2_{n-1}}{2}\times\frac{M_{n-1}Q}{(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-1})(M+M+M_1+\text{etc.}+M_{n-2})}-\text{etc.}-$$

$$-L_{n-k+1}\times\frac{M_{n-k+1}QL}{(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-k+1})(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-k})}+$$

$$+\frac{L^2_{n-k+1}}{2}\times\frac{M_{n-k+1}Q}{(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-k+1})(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-k})}\Bigg]\lambda+$$

$$+\frac{QL}{2(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-k})}\lambda^2-\frac{Q}{6(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-k})}\lambda^3.$$

Pour avoir la flexion à l'extrémité du ressort, il suffit de faire, dans la formule ci-dessus, $k=n$ et $\lambda=L$; ce qui donne en réduisant :

$$\text{(II bis)}\quad i=\frac{QL^3}{3M}+QL_1\frac{M_1}{(M+M_1)M}\left(LL_1-\frac{L^2_1}{3}-L^2\right)+$$

$$+QL_2\frac{M_2}{(M+M_1+M_2)(M+M_1)}\left(LL_2-\frac{L^2_2}{3}-L^2\right)+$$

$$+QL_3\frac{M_3}{(M+M_1+M_2+M_3)(M+M_1+M_2)}\left(LL_3-\frac{L^2_3}{3}-L^2\right)+\text{etc.}+$$

$$+QL_n\frac{M_n}{(M+M_1+\text{etc.}+M_n)(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-1})}\left(LL_n-\frac{L^2_n}{3}-L^2\right).$$

Quand toutes les feuilles sont de même épaisseur, cette formule devient, en désignant maintenant par n, au lieu de $n+1$, le nombre total des feuilles :

$$\text{(III)} \quad i = \frac{QL^3}{3M} + \frac{QL_1}{1.2M}\left(LL_1 - \frac{L_1^2}{3} - L^2\right) +$$
$$+ \frac{QL_2}{2.3M}\left(LL_2 - \frac{L_2^2}{3} - L^2\right) +$$
$$+ \frac{QL_3}{3.4M}\left(LL_3 - \frac{L_3^2}{3} - L^2\right) + \text{etc.} +$$
$$+ \frac{QL_{n-1}}{(n-1)nM}\left(LL_{n-1} - \frac{L_{n-1}^2}{3} - L^2\right).$$

Cette formule elle-même, dans le cas où toutes les feuilles ont la même épaisseur, peut être ramenée à la forme ci-dessous. On trouve (*voir*, pour la démonstration, la note de la fin), en appelant l la longueur de l'étagement, et n le nombre des feuilles :

$$\text{(IV)} \quad i = \frac{QL^3}{3nM} + \frac{Ql^2}{3M}\left[\frac{(n-1)(n-2)}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \right.$$
$$\left. + \frac{1}{4} + \text{etc.} + \frac{1}{n}\right].$$

Telle est la formule très-simple qui donne la flexion, quand les feuilles sont toutes de même épaisseur, que le ressort, du reste, soit complet ou incomplet ; seulement, dans cette formule, ainsi que dans toutes celles qui précèdent, il n'est pas tenu compte des amincissements qui ont, en général, très-peu d'influence sur la flexion, mais qui, quelquefois, ne sont pourtant pas négligeables ; aussi, un peu plus loin, vais-je donner la flexion correspondante à ce cas.

On peut aussi transformer d'une manière analogue la formule ordinaire de la flexion, dans le cas général où les épaisseurs des feuilles sont différentes. La formule à laquelle on arrive est celle-ci, l, l_1, l_2, etc., étant les divers étagements, et n le nombre total des feuilles :

$$(V)\quad i=\frac{QL^3}{3}\Big[\frac{1}{M}-\frac{M_1}{(M+M_1)M}-\frac{M_2}{(M+M_1+M_2)(M+M_1)}-$$
$$-\text{etc.}-\frac{M_{n-1}}{(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-1})(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-2})}\Big]+$$
$$+\frac{Q}{3}\Big[\frac{M_1}{(M+M_1)M}l^3+\frac{M_2}{(M+M_1+M_2)(M+M_1)}(l+l_1)^3+$$
$$+\text{etc.}+\frac{M_{n-1}}{(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-1})(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-2})}(l+$$
$$+l_1+\text{etc.}+l_{n-2})^3\Big].$$

J'ai appliqué cette méthode générale à la recherche de la formule de la flexion, quand les feuilles ont toutes la même épaisseur et qu'on veut tenir compte des amincissements, ceux-ci étant formés d'après la règle qui sera exposée dans le second chapitre.

J'ai obtenu, quand le ressort est complet :

$$(VI)\qquad i=\frac{QL^2l}{2M}.$$

Quand le ressort est incomplet j'ai trouvé, aussi en tenant compte des amincissements, la formule suivante :

$$(VII)\qquad i=\frac{Q}{6nM}[2L^3+(nl)^3].$$

Dans les deux formules précédentes, l représente l'étagement des feuilles de même épaisseur, qui, comme on le verra plus loin dans le second chapitre, doit être le même pour toutes celles-ci, et n est le nombre de ces feuilles égales. Ces deux formules sont très-utiles et d'un usage très-fréquent, comme on le verra plus loin.

Ces formules ont été appliquées à un assez grand nombre de résultats d'expériences, avec lesquelles elles se sont accordées pleinement, ainsi que le montrent les quelques résultats suivants :

NATURE DU RESSORT.	Charge d'épreuve.	FLEXION donnée par l'épreuve.	FLEXION donnée par la formule.
	kil.	mèt.	mèt.
Ressort à huit feuilles de wagon à marchandises du chemin de fer de Lyon.	2.000	0,057	0,0576
Ressort à neuf feuilles de roue motrice de machine locomotive du chemin de Tours à Nantes.	4.000	0,038	0,036
Ressort à sept feuilles de diligence (messageries nationales).	1.500	0,074	0,077
Ressort à huit feuilles de wagon de balast, du chemin de fer de l'Ouest.	2.000	0,055	0,055
Idem.	4,500	0,125	0,125
Ressort à trois feuilles, plus un auxiliaire de wagon de balast du chemin de l'Ouest.	2.000	0,055	0,055
Idem.	4.500	0,094	0,095

La formule (II) conduit à une remarque importante : c'est que, toutes choses égales d'ailleurs, la flexion, en un point quelconque du ressort, est : 1° proportionnelle à la charge ; 2° indépendante de la courbure initiale des lames ainsi que des longueurs de celles-ci au delà du point dont on cherche la flexion.

J'ai même démontré (*voir* la note de la fin) que la flexion est indépendante de la forme primitive des lames, que celle-ci soit un arc de cercle de quelque rayon que ce soit, ou même toute autre courbe ; qu'elle était, dans tous les cas, proportionnelle à la pression, et que la diminution du sinus de l'angle formé par la tangente en un point quelconque du ressort avec le plan qui partage le ressort en deux parties symétriques, était aussi toujours proportionnelle à la pression. J'ai indiqué en même temps par quelle marche on déterminerait alors la flexion.

Calcul de la pression et du frottement qui ont lieu entre les lames d'un ressort.

Il est important de connaître quelle est la pression qui s'exerce entre les lames d'un ressort pour calculer le frottement. Cela est utile aussi pour s'assurer que les feuilles ne bâillent pas entre elles. Voici comment. S'il

y a du jour en un certain point entre deux feuilles, je supposerai par la pensée qu'elles aient été réunies par un lien fictif, lequel sera dès lors soumis à une tension réciproque de la part des deux feuilles, et je supposerai même que ce lien les réunisse de molécule à molécule.

J'aurai sous la charge 2Q un état d'équilibre d'ailleurs différent de celui existant réellement, mais qui, dans ce cas, sera celui donné par les équations (1), (2), (3), etc., du commencement, pourvu qu'on y regarde alors p comme négatif, car l'état de chaque feuille se trouvera par ces mêmes équations; seulement, là où deux feuilles bâilleraient et où ces liens auraient été nécessaires, la feuille supérieure serait tirée au lieu d'être pressée par la feuille inférieure. Mais, dans tous les cas, pourvu que les feuilles soient en contact, qu'elles le soient d'elles-mêmes ou par l'effet d'un lien rapprochant les surfaces qui bâillent, l'état d'équilibre sera donné par les équations (1), (2), (3), etc.; seulement quand p sera positif, il y aura pression entre les deux feuilles, et quand p sera négatif, il y aura tension; ou, ce qui revient au même, en supprimant ces liaisons, on voit que les feuilles bâilleront. Quand p sera positif, on verra de plus aussi quelle est la pression réciproque qui s'exerce entre les différentes feuilles, et on déduira immédiatement les frottements.

Je cherche d'abord la valeur générale de p, entre les deux premières feuilles, dans la partie comprise entre L_1 et L_2 (*fig.* 2). A cet effet, je reprends l'équation posée dans les premières pages :

$$\int_{\lambda}^{L_1} p(l-\lambda)dl = M_1\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{\rho + \epsilon}\right).$$

Pour extraire de là la valeur générale de p, je diffé-

rentie sous le signe $\int$, par rapport à λ comme variable indépendante. J'ai ainsi, en désignant par ϖ la pression réciproque, rapportée à l'unité de longueur, qui a lieu à la section répondant à λ :

$$-\varpi\lambda-\int_{\lambda}^{L_1} pdl+\varpi\lambda \text{ ou } -\int_{\lambda}^{L_1} pdl=\frac{d}{d\lambda}\left[M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{\rho+\varepsilon}\right)\right].$$

En différentiant une seconde fois par rapport à λ, il vient

$$(b_1) \qquad \varpi=\frac{d^2}{d\lambda^2}\left[M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{\rho+\varepsilon}\right)\right].$$

où λ répond à une section quelconque entre L_1 et L_2.

Connaissant l'expression générale du rayon de courbure sous charge, on voit qu'on a la pression réciproque, dans l'étendue L_1L_2, par une dérivée seconde.

On voit, en même temps, que la somme ou la résultante des pressions réciproques, dans le même intervalle, ou ;

$$(a_1) \qquad \int_{\lambda}^{L_1} pdl=-\frac{d}{d\lambda}\left[M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{\rho+\varepsilon}\right)\right]$$

s'obtient à l'aide de la dérivée première de la même expression.

Pour les valeurs de λ comprises entre L_2 et L_3, désignons toujours par ϖ la pression rapportée à l'unité de longueur entre les deux premières feuilles, et par ϖ_1, celle entre la deuxième et la troisième. En différentiant deux fois de suite les équations du commencement, qui servent à obtenir les valeurs correspondantes de ρ, on voit aisément que

$$(a_2)\left\{\begin{aligned}&\int_{\lambda}^{L_1} pdl=-\frac{d}{d\lambda}\left[M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{\rho+\varepsilon}\right)\right]-\\&\qquad -\frac{d}{d\lambda}\left[M_2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{\rho+\varepsilon_1}\right)\right].\\&\int_{\lambda}^{L_2} p_1dl=-\frac{d}{d\lambda}\left[M_2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{\rho+\varepsilon_1}\right)\right].\end{aligned}\right.$$

et que

$$(b_2)\left\{\begin{aligned}\varpi &= \frac{d^2}{d\lambda^2}\left[M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{\rho+\varepsilon}\right)\right]+\frac{d^2}{d\lambda^2}\left[M_2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{\rho+\varepsilon_1}\right)\right].\\ \varpi_1 &= \frac{d^2}{d\lambda^2}\left[M_2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{\rho+\varepsilon_1}\right)\right].\end{aligned}\right.$$

On trouverait absolument de même pour les valeurs de λ comprises entre L_3 et L_4, en conservant les mêmes notations, et désignant par ϖ_2 la pression réciproque, rapportée à l'unité de longueur, entre la troisième et la quatrième feuilles :

$$(a_3)\left\{\begin{aligned}\int_\lambda^{L_1} p\,dl &= -\frac{d}{d\lambda}\left[M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{\rho+\varepsilon}\right)\right]-\frac{d}{d\lambda}\left[M_2\left(\frac{1}{r_2}-\right.\right.\\ &\quad\left.\left.-\frac{1}{\rho+\varepsilon_1}\right)\right]-\frac{d}{d\lambda}\left[M_3\left(\frac{1}{r_3}-\frac{1}{\rho+\varepsilon_2}\right)\right];\\ \int_\lambda^{L_2} p_1\,dl &= -\frac{d}{d\lambda}\left[M_2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{\rho+\varepsilon_1}\right)\right]-\frac{d}{d\lambda}\left[M_3\left(\frac{1}{r_3}-\frac{1}{\rho+\varepsilon_2}\right)\right]\\ \int_\lambda^{L_3} p_2\,dl &= -\frac{d}{d\lambda}\left[M_3\left(\frac{1}{r_3}-\frac{1}{\rho+\varepsilon_2}\right)\right];\end{aligned}\right.$$

puis

$$(b_3)\left\{\begin{aligned}\varpi &= \frac{d^2}{d\lambda^2}\left[M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{\rho+\varepsilon}\right)\right]+\frac{d^2}{d\lambda^2}\left[M_2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{\rho+\varepsilon_1}\right)\right]+\\ &\quad+\frac{d^2}{d\lambda^2}\left[M_3\left(\frac{1}{r_3}-\frac{1}{\rho+\varepsilon_2}\right)\right];\\ \varpi_1 &= \frac{d^2}{d\lambda^2}\left[M^2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{\rho+\varepsilon_1}\right)\right]+\frac{d^2}{d\lambda^2}\left[M_3\left(\frac{1}{r_3}-\frac{1}{\rho+\varepsilon_2}\right)\right];\\ \varpi_2 &= \frac{d^2}{d\lambda^2}\left[M_3\left(\frac{1}{r_3}-\frac{1}{\rho+\varepsilon_2}\right)\right];\end{aligned}\right.$$

et ainsi de suite. Il est aisé de reconnaître que ces formules se continuent d'après la même loi dans toute l'étendue du ressort,

Les formules (b_1), (b_2), (b_3), etc,, serviront à voir, d'après le signe de ϖ,, ϖ_1, ϖ_2, etc., si les feuilles

bâillent quelque part. Elles montreront en outre la manière dont la pression est répartie dans toute l'étendue du ressort. Quant aux formules (a_1), (a_2), (a_3), etc., elles donneront la résultante des pressions supportées par chaque lame dans une partie quelconque de sa longueur.

Mouvement oscillatoire d'un ressort.

On peut se demander quelle est la nature du mouvement oscillatoire d'un ressort. Je supposerai qu'il s'agisse seulement d'un ressort de l'espèce ordinaire, c'est-à-dire dont les feuilles en fabrication joignent toutes entre elles, et que, de plus, on ne tienne pas compte du frottement.

Soit $2Q$ la charge portée par le ressort; en négligeant la masse de celui-ci, si l'on désigne par g la gravité, $\frac{2Q}{g}$ sera la masse en mouvement. Soit i la flexion produite par la charge $2Q$, quand l'équilibre existe, et soit $i+x$ la flexion qui a lieu à un instant quelconque du mouvement oscillatoire; la quantité x sera positive ou négative suivant que le ressort sera au-dessous ou au-dessus de sa position d'équilibre. Il résulte de là que $\frac{i+x}{i}2Q$ sera la mesure de l'action exercée par le ressort contre la masse qui est portée par lui.

L'équation du mouvement sera donc :

$$\frac{2Q}{g}\frac{d^2x}{dt^2} = 2Q - \frac{i+x}{i}2Q,$$

ou

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{g}{i}x.$$

Si u désigne la vitesse qui a lieu dans la position répondant à l'équilibre du ressort, la constante est égale à u^2, et l'on a :

$$\frac{dx^2}{dt^2} = u^2 - \frac{g}{i}x^2;$$

par conséquent la vitesse

$$\frac{dx}{dt} = \pm \sqrt{u^2 - \frac{g}{i}x^2}.$$

On voit que la vitesse est à son maximum quand le ressort passe par sa position d'équilibre ; qu'elle décroît ensuite jusqu'à $x = u\sqrt{\frac{i}{g}}$, où elle devient nulle; puis qu'elle repasse par les mêmes valeurs en sens contraire, jusqu'à $x = -u\sqrt{\frac{i}{g}}$, où elle devient nulle de nouveau; de sorte que l'amplitude des oscillations est égale à $2u\sqrt{\frac{i}{g}}$. Cela indique déjà que les oscillations, toutes choses égales d'ailleurs, sont d'autant plus grandes que i l'est davantage, et par conséquent que la flexion du ressort, en équilibre sous sa charge, est plus grande.

De la dernière équation on tire :

$$dt = \frac{dx}{\sqrt{u^2 - \frac{g}{i}x^2}},$$

qu'on peut mettre sous la forme :

$$dt = \sqrt{\frac{i}{g}}\,\frac{d\left(x\sqrt{\frac{g}{iu^2}}\right)}{\sqrt{1 - \frac{gx^2}{iu^2}}}$$

d'où

$$t = \sqrt{\frac{i}{g}}\ \text{arc sin.}\left(\frac{x}{u}\sqrt{\frac{g}{i}}\right).$$

Je n'ajoute pas de constante, parce qu'elle est nulle, si, comme je le suppose, on compte le temps à partir de la position d'équilibre du ressort.

Si l'on fait dans cette dernière formule $x = u\sqrt{\frac{i}{g}}$, on trouve, pour le temps θ, d'une demi-oscillation :

$$\theta = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{i}{g}}.$$

Donc le temps d'une oscillation entière, ou

$$2\theta = \pi\sqrt{\frac{i}{g}}.$$

Ce résultat indique que le temps d'une oscillation est le même que pour un pendule dont la longueur serait égale à i; c'est-à-dire à la flexion du ressort supposé en équilibre sous sa charge.

Ainsi, plus un ressort est chargé et plus il oscille lentement; mais aussi, comme on l'a vu plus haut, plus ses oscillations sont grandes, et de même; de deux ressorts oscillant sous une même charge, celui qui est le plus flexible oscille plus lentement et l'amplitude de ses excursions est plus grande.

Ressorts de traction et ressorts de choc.

Les ressorts de traction se comportent exactement comme ceux de suspension.

Quant aux ressorts de choc, voici la manière dont ils agissent :

Supposons qu'un ressort se comprime par l'effet d'un choc; soit à un instant quelconque φ sa flexion et $2q$ la pression équivalente à cette flexion, on aura :

$$\varphi = 2Aq,$$

A étant un coefficient constant qui ne dépend que des dimensions et du coefficient d'élasticité du ressort; le travail résistant élémentaire du ressort est donc :

$$2q d\varphi = 4A q dq.$$

Quand le ressort a fini de se comprimer, j'appelle i sa flexion, et $2Q$ la charge capable de produire cette flexion. Il est clair que, quand le ressort cesse de se comprimer, c'est que la pression qu'il éprouve de la part du corps qui le presse est égale à $2Q$, car le ressort reste alors un instant en équilibre. Le travail résistant développé par le ressort pendant sa compression est donc :

$$\int_0^Q 4A q dq = 2AQ^2.$$

Si donc j'appelle FH le travail moteur servant de mesure au choc qui a comprimé le ressort, et qui est donné, j'aurai :

$$2AQ^2 = FH.$$

Soit i la flexion donnée, que le choc FH a dû produire.

La force $2Q$ donnant la même flexion, on a : $i = 2AQ$; donc $A = \frac{i}{2Q}$. Remplaçant A par cette valeur, dans l'équation ci-dessus, elle devient :

$$Qi = FH, \qquad \text{d'où} \qquad 2Q = \frac{2FH}{i}.$$

Ainsi, dire qu'un choc FH doit produire une flexion i, cela revient à dire que cette flexion est produite par une charge égale à $\frac{2FH}{i}$, placée en équilibre sur le ressort. On voit en même temps que Qi, qui mesure le travail FH, n'est autre que le travail qu'on obtient en

laissant tomber la moitié de la charge de la hauteur i, et que l'effet produit sur le ressort est le même que si on posait directement la charge 2Q dans la position d'équilibre du ressort.

Si le travail FH est le travail normal maximum que doive supporter le ressort, on connaîtra donc sa flexibilité, car celle-ci est égale à

$$\frac{i}{2Q} = \frac{i^2}{2FH}.$$

Quant à la résistance absolue, ou la charge limite 2P, qui répondrait, par exemple, à l'aplatissement complet du ressort, elle n'est pas donnée, mais voici comment elle se conclura des éléments de la question. On suppose que le ressort doive s'aplatir complétement par l'effet d'un choc F'H', supérieur à FH, et auquel répondrait la limite de résistance du ressort. Si f est la flèche de fabrication de celui-ci, on aurait encore comme ci-dessus :

$$2P = \frac{2F'H'}{f}; \quad \text{mais } f : i :: 2P : 2Q;$$

d'où

$$f = i \times \frac{2P}{2Q}.$$

Remplaçant f par cette valeur, on a

$$2P = \sqrt{\frac{2F'H'}{i}} \times 2Q.$$

On peut trouver sous une autre forme une expression simple du choc qu'un ressort quelconque peut amortir, et prouver en même temps que ce choc ne dépend que du volume du ressort et des allongements qu'on veut faire subir à l'acier.

En effet, soit une section quelconque d'une feuille,

et adv un de ses éléments ; la force attractive ou répulsive sera :

$$Eavdv\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho}\right).$$

Or, si l'on considère le petit prisme ayant pour base adv, et pour longueur primitive $d\lambda$, la longueur actuelle de ce prisme est $d\lambda+\alpha d\lambda$, α étant l'allongement ou $v\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho}\right)$. En passant de la position actuelle répondant au rayon ρ, à la suivante répondant au rayon $\rho+d\rho$, la longueur de ce prisme s'accroît de $d\alpha d\lambda$, c'est-à-dire de $vd\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho}\right)d\lambda$ et le travail élémentaire développé sur ce petit prisme est :

$$Eavdv\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho}\right)\times vd\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho}\right)d\lambda,$$

ou

$$Eav^2dv\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho}\right)d\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho}\right)d\lambda.$$

Le travail total développé par ce petit prisme en passant du rayon ρ_0 au rayon ρ_1 est donc :

$$\frac{Eav^2dv}{2}\left[\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho_1}\right)^2-\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho_0}\right)^2\right]d\lambda.$$

Si l'on considère la section entière de la feuille ayant l'épaisseur $d\lambda$, ce prisme fournira un travail égal à :

$$\frac{1}{2}\left[\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho_1}\right)^2-\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho_0}\right)^2\right]d\lambda\int Eav^2dv\,;$$

mais

$$\int Eav^2dv=M.$$

Ce travail est donc

$$\frac{M}{2}\left[\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho_1}\right)^2-\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho_0}\right)^2\right]d\lambda.$$

Donc, en appelant 2L la longueur totale de la feuille, le travail qu'elle fournira sera :

$$\int_0^L M\left[\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho_1}\right)^2-\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho_0}\right)^2\right]d\lambda.$$

Supposons que la feuille soit d'une épaisseur uniforme, qu'elle parte de son rayon de fabrication et qu'elle arrive à l'aplatissement complet, le travail devient alors simplement :

$$\frac{ML}{r^2}.$$

On peut mettre cette expression sous une autre forme ; ainsi :

$$\frac{ML}{r^2}=\frac{Eae^3L}{12r^2},$$

or

$$\alpha=\frac{e}{2r} \quad \text{ou} \quad e=2r\alpha;$$

donc

$$r^2=\frac{e^2}{4\alpha^2} \quad \text{et} \quad \frac{ML}{r^2}=\frac{EaeL\alpha^2}{3}.$$

Or, aeL est le volume U de la demi-feuille ; le travail développé est donc :

$$\frac{EU\alpha^2}{3}.$$

La même chose peut se dire de chaque feuille. Le travail développé par le ressort est donc :

$$\Sigma\,\frac{EU\alpha^2}{3}.$$

et si toutes les feuilles ont le même allongement final, et que 2V soit le volume du ressort, le travail développé sera :

$$\frac{EV\alpha^2}{3}.$$

On peut remarquer qu'il résulte de là que tous les ressorts de choc qui éprouvent dans toute leur masse un même allongement, correspondant à l'aplatissement sous l'effet d'un même choc ont nécessairement le même volume.

Il y a des cas où le choc ne commence pas à partir de la position de fabrication des feuilles. Dans ce cas, soit, pour une feuille quelconque, α_0 l'allongement proportionnel, constant ou variable, qui a lieu au commencement du choc. Les formules générales établies au commencement montrent facilement qu'on a alors pour le travail employé à redresser cette feuille :

$$\frac{EU\alpha^2}{3} - \int_0^U \alpha^2_0 dU.$$

Le travail total employé pour aplatir le ressort entier sera donc :

$$\frac{E}{3}\left(\alpha^2 V - \Sigma \int_0^U \alpha^2_0 dU\right).$$

Le travail se trouve donc diminué toutes les fois que le ressort ne part pas de sa position de fabrication. Or c'est ce qui arrive pour tous les ressorts de choc et de traction qui sont posés avec une certaine bande ; mais on voit que la différence sera toujours assez faible quand α_0 ne sera pas très-grand, parce que α_0 n'entre que par son quarré. Ainsi, dans les ressorts ordinaires, où α_0 est environ 1/3 de α, on perd environ 1/9 de la puissance du ressort pour résister au choc. On voit, en même temps, qu'il y a avantage à faire en sorte que la bande de pose du ressort qui répond à un effort d'environ 1000 kilogrammes, produise un allongement α_0 le plus faible possible ; par conséquent, sous ce point de vue, il y a avantage, toutes choses égales d'ailleurs, à employer des ressorts un peu roides plutôt que très-flexibles.

Quand les feuilles ont des épaisseurs décroissantes, ou même rigoureusement égales, il en résulte une certaine bande d'assemblage qui, par la même raison, diminue la puissance du ressort comme choc; mais la différence est toujours assez faible.

CHAPITRE DEUXIÈME.

DES FORMES LES PLUS CONVENABLES A DONNER AUX RESSORTS ET DES RÈGLES POUR LES CALCULER.

Il s'agit maintenant d'établir les principes à l'aide desquels on devra, au moyen des notions précédentes, calculer, sans avoir recours à aucun tâtonnement, les éléments d'un ressort à établir dans des circonstances données.

Forme et courbure de fabrication des feuilles.

En premier lieu, il a été démontré que la forme et la courbure initiales des lames n'avaient pas d'influence sur la flexion et n'en avaient pas non plus sur les allongements et raccourcissements proportionnels qui ont lieu dans toute l'étendue du ressort, du moins quand les feuilles n'ont pas de bande de fabrication les unes par rapport aux autres.

Il résulte de là qu'il est à peu près indifférent de prendre une courbe ou une autre pour la forme initiale des lames. Il y a donc avantage, sous le rapport de la simplicité, à choisir des arcs de cercle, et c'est cette forme que je suppose adoptée.

Règle des épaisseurs. Aplatissement.

En second lieu, il est évident que la forme du ressort la plus favorable doit être combinée de manière à fatiguer également dans toutes ses parties, sous une charge quelconque, ou du moins sous la charge maxima qu'il ait à supporter, ou plutôt enfin dans la position extrême à laquelle il soit amené par l'effet de la charge et des oscillations; c'est-à-dire à ce que, pour une section

quelconque de quelque lame que ce soit, les allongements ou raccourcissements proportionnels maxima soient alors tous égaux. Comme conséquence immédiate de cette seconde condition, il résulte; si le ressort travaille également dans toutes ses parties sous une charge quelconque, que celui-ci doit être disposé de manière à pouvoir être aplati complétement sous une charge suffisamment grande. En effet, si une charge convenable l'aplatit au centre de la maîtresse feuille, l'allongement proportionnel maximum sera en ce point :

$$\alpha = v\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho}\right) = \frac{v}{r},$$

puisque

$$\rho = \infty;$$

donc

$$\alpha = \frac{v}{r} = \frac{e}{2r}.$$

Si les allongements sont les mêmes partout, on aura pour un autre point de la maîtresse feuille :

$$\alpha = \frac{e}{2r};$$

mais en ce dernier point,

$$\alpha = v\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho'}\right) = \frac{e}{2}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho'}\right);$$

donc

$$\frac{1}{\rho'} = 0 \quad \text{et} \quad \rho' = \infty.$$

Ainsi le ressort s'aplatira complétement.

Réciproquement, si cette condition est réalisée, l'allongement proportionnel, le ressort étant aplati, sera le même dans toute l'étendue de la maîtresse feuille, car on aura partout :

$$\alpha = \frac{e}{2r}.$$

Quant aux autres lames, les conséquences de l'aplatissement sont les suivantes.

Si elles n'ont pas de bande initiale, ou si elles n'en ont qu'une insensible ou négligeable, comme $\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho}$ sera sensiblement le même pour elles que pour la maîtresse feuille, il faut, pour que α soit le même aussi, que v soit le même, et par csonéquent que l'épaisseur e soit la même pour toutes les lames.

Réciproquement, si e est la même pour toutes les les lames, $\alpha = \frac{e}{2}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho}\right)$ sera aussi sensiblement le même pour toutes, dans une même section transversale, quelle que soit la charge.

Si certaines feuilles ont une bande notable, c'est-à-dire si, pour quelqu'une d'entre elles, r est plus petit que pour la maîtresse feuille, alors $\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho}$ sera plus grand que pour la maîtresse feuille, et, pour que toutes les feuilles fatiguent également et que α soit le même pour toutes, il faut que v, et par suite e, soit plus petit pour ces feuilles-là que pour la maîtresse feuille. Ainsi $\alpha = \frac{e}{2r}$, ou $e = 2r\alpha$, indique une première relation qui doit exister pour chaque feuille entre son épaisseur, son rayon de fabrication et l'allongement proportionnel de la feuille quand elle est aplatie.

Voyons maintenant quelles sont les dispositions qui feront que le ressort soit susceptible d'être aplati complétement. Il faut pour cela que, sous une charge convenable P appliquée à chaque extrémité, les rayons de courbure de la maîtresse feuille deviennent infinis. En remontant aux formules (1), (2), (3), etc., données dans le commencement pour les valeurs inverses des — Règle des étagements.

rayons de courbure sous charge, on voit qu'il faut que l'on ait :

$$\frac{M}{r} - P(L - L_1) = o,$$

$$\frac{M}{r} + \frac{M_1}{r_1} - P(L - L_2) = o,$$

$$\frac{M}{r} + \frac{M_1}{r_1} + \frac{M_2}{r_2} - P(L - L_3) = o, \text{ etc.};$$

d'où l'on tire

$$L - L_1 = \frac{M}{Pr},$$

$$L_1 - L_2 = \frac{M_1}{Pr_1},$$

$$L_2 - L_3 = \frac{M_2}{Pr_2}, \text{ etc.}$$

Telles sont les formules qui déterminent les étagements. Quand les feuilles n'ont qu'une bande initiale insensible ou nulle, on a vu plus haut qu'alors l'épaisseur devait être la même pour toutes les feuilles; on peut donc écrire, dans ce cas, $r = r_1 = r_2 =$ etc., et $M = M_1 = M_2 =$ etc.; d'où résulte $L - L_1 = L_1 - L_2 = L_2 - L_3 =$ etc. Ainsi tous les étagements sont alors égaux et égaux chacun à $\frac{M}{Pr}$.

Si certaines feuilles ont une bande initiale, on a vu un peu plus haut que leur épaisseur devrait être moindre que celle de la maîtresse feuille, et, en supposant le ressort aplati, comme alors $\alpha = \frac{e}{2r}$, pour que α soit le même, il faut que $\frac{e_k}{r_k} = \frac{e}{r}$, l'indice k se rapportant à une feuille ayant une bande initiale. En appelant l_k la longueur de l'étagement partant de l'extrémité de cette feuille, on aurait :

$$l_k = \frac{M_k}{Pr_k},$$

et, pour la maîtresse feuille,

$$l = \frac{M}{Pr};$$

donc

$$\frac{e}{l} = P\frac{re}{M} = \frac{12P}{Ea}\frac{r}{e^2},$$

et, de même,

$$\frac{e_k}{l_k} = P\frac{r_k e}{M_k} = \frac{12P}{Ea}\frac{r_k}{e_k^2}.$$

D'un autre côté, pour que toutes les feuilles fatiguent également et que α soit le même pour toutes, on doit avoir :

$$\frac{e}{r} = \frac{e_k}{r_k};$$

donc

$$\frac{e_k^2}{r_k} = \frac{ee_k}{r} < \frac{e^2}{r},$$

puisque

$$e_k < e.$$

Donc

$$\frac{r_k}{e_k^2} > \frac{r}{e^2},$$

et, par conséquent,

$$\frac{e_k}{l_k} > \frac{e}{l}.$$

Voyons ce qui résulte de là relativement au volume du ressort.

Si l'on veut se former une idée du volume, et par suite du poids d'un ressort, il suffit de le supposer aplati complétement. S'il n'a qu'une bande initiale insensible, et par conséquent que toutes les feuilles soient de même épaisseur, les étagements seront tous égaux, les angles A, B,

G, etc., K (*fig.* 4) seront tous sur une même ligne droite, et le volume du demi-ressort sera celui du prisme dont la base serait le trapèze HTKN, moins les triangles ABC, BDG, etc.; si une feuille X, par exemple, a une bande initiale, et, par suite, une épaisseur moindre, on aura pour elle $\frac{e_k}{l_k} > \frac{e}{l}$; c'est-à-dire qu'au lieu de se terminer en DG, elle aboutira en dg, tel que l'angle, $d\mathrm{B}g > \mathrm{DBG}$. Le profil extérieur du ressort supposé aplati sera donc dévié vers le dehors. Il ne pourra pas d'ailleurs rentrer vers l'intérieur de la droite BgS, du moins dans les ressorts habituels. En effet, le rayon de fabrication de toute feuille placée plus bas que X sera tout au plus égal à celui de X; dès lors, à cause que $\frac{e}{r}$ est le même pour toutes les feuilles, on verrait encore comme ci-dessus que $\frac{e}{l}$ est tout au plus égal, pour X, à ce qu'est ce rapport pour toute feuille placée plus bas. Donc le profil extérieur du ressort aplati ne pourra pas rentrer vers l'intérieur de la droite BgS, laquelle est forcément extérieure à ABGK. D'un autre côté, le ressort devra se prolonger au moins aussi bas que la dernière feuille NK du ressort qui a pour profil la droite ABGK. En effet, les formules précédentes donnent :

$$l_k : l :: \frac{e^3_k}{r_k} : \frac{e^3}{r}.$$

Or on a vu que

$$\frac{e^2_k}{r_k} < \frac{e^2}{r};$$

donc, à plus forte raison, comme $e_k < e$, on a

$$\frac{e^3_k}{r_k} < \frac{e^3}{r},$$

et par conséquent $l_k < l$. D'ailleurs, en descendant plus bas dans le ressort, l_k ne peut pas augmenter, puisque e_k lui-même ne doit pas augmenter; donc le ressort doit descendre au moins aussi bas que NK, sans quoi la dernière feuille aurait une longueur plus grande que celle de l'étagement qui lui correspond.

Enfin la somme des triangles ABC, BDG, etc., est plus grande que celle des triangles correspondants du ressort modifié, comme il vient d'être dit. En effet, on a sensiblement $ABC + BDG + \text{etc.} = \frac{1}{2} eL$. Or, dans le ressort modifié, la somme des triangles en question est :

$$\frac{1}{2}(el + e_1 l_1 + \text{etc.}) < \frac{1}{2} e(l + l_1 + \text{etc.}),$$

puisque quelques-unes des épaisseurs deviennent plus petites que e; or

$$\frac{1}{2} e(l + l_1 + \text{etc.}) = \frac{1}{2} eL.$$

Il résulte de là que, toutes choses égales d'ailleurs, un ressort à feuilles de même épaisseur a un moindre volume que tout autre ressort fabriqué avec la même maîtresse feuille, et exigeant la même charge pour s'aplatir complétement, par conséquent perdant la même flèche sous une même charge, et ayant, par suite, la même flexibilité et la même résistance absolue, puisque les allongements proportionnels maxima sont d'ailleurs les mêmes dans l'aplatissement.

Il faut toutefois faire attention qu'en diminuant les épaisseurs des feuilles inférieures, et, par suite, leurs rayons, on donne à la maîtresse feuille un rayon plus petit que celui de fabrication, et, par conséquent, la flèche du ressort devient un peu plus grande que celle

de la maîtresse feuille; mais cette différence est assez faible pour pouvoir être négligée.

En effet, si l'épaisseur de la seconde feuille diffère peu de celle de la maîtresse feuille, son rayon sera aussi peu différent du sien, et alors la diminution qu'elle produira dans la flèche sera peu de chose. Si son rayon diffère beaucoup, il en sera de même de son épaisseur, et comme en les assemblant chacune d'elles résiste proportionnellement à son moment d'élasticité, ou au cube de son épaisseur, il en résulte que, quoique la différence des courbures puisse être grande, la flèche de la maîtresse feuille ne sera néanmoins que peu modifiée. Ce raisonnement s'applique, à plus forte raison, aux feuilles suivantes, qui auront de moins en moins d'influence sur la flèche du ressort. En effet, il faut d'abord qu'elles changent la courbure de toutes les feuilles qui sont au-dessus, et la résistance de chacune de celles-ci varie comme le cube de son épaisseur; de plus, elles agissent plus près du centre du ressort et sur des flèches beaucoup plus petites.

Au reste, les formules mettent en évidence le peu d'influence qu'ont sur la flèche de la maîtresse feuille les feuilles inférieures, quand celles-ci ont des épaisseurs décroissantes.

En effet, la flèche d'assemblage d'un ressort sous charge se déduit, comme on l'a vu, de la formule (I), en y faisant $Q = o$, $k = n$, et $\lambda = L$. Or il est évident que, dans le cas où certaines feuilles ont des épaisseurs moindres que celle de la maîtresse feuille, tous les termes, excepté celui en λ^2, sont négligeables. En effet, le coefficient d'un terme quelconque sera de la forme :

$$M_{n-k+1}\frac{\left[M\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{r_{n-k+1}}\right)+M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_{n-k+1}}\right)+\text{etc.}+M_{n-k}\left(\frac{1}{r_{n-k}}-\frac{1}{r_{n-k+1}}\right)\right]}{(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-k+1})(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-k})}$$

Or, si l'épaisseur e_{n-k+1} est sensiblement égale à celle de la maîtresse feuille, il en est de même de toutes celles placées au-dessus, et les rayons r_{n-k+1}, r_{n-k}, etc., r_2, r_1 peuvent être regardés comme égaux à r, de sorte que ce terme disparaît devant celui en λ^2. Si l'épaisseur e_{n-k+1} diffère d'une manière notable de e, alors M_{n-k+1}, qui est proportionnel au cube de l'épaisseur, rend ce terme négligeable devant celui en λ^2. Il résulte de là que la flèche d'assemblage se réduit au terme en λ^2, lequel, en faisant $k=n$ et $\lambda=L$, devient $\frac{L^2}{2r}$, c'est-à-dire précisément la flèche de fabrication de la maîtresse feuille.

On est assuré par là qu'un ressort dont les feuilles sont d'épaisseurs égales, et ont par conséquent des rayons égaux, peut être regardé, avec une grande approximation, comme ayant un volume plus petit que celui de tout autre ressort monté sur la même maîtresse feuille, ayant la même flexibilité et la même résistance absolue, mais dont les feuilles auraient toutes, ou quelques-unes d'entre elles, des épaisseurs moindres que celle de la maîtresse feuille.

Je me hâte d'observer, et je le ferai voir un peu plus loin, qu'une fois le ressort à feuilles de même épaisseur calculé, on peut en déduire une infinité de ressorts à feuilles d'épaisseurs décroissantes, ainsi que de ressorts à feuilles d'épaisseurs croissantes ayant la même flexibilité et la même résistance, et ayant aussi très-sensiblement le même poids; mais alors la maîtresse feuille n'est plus la même.

Il a été démontré qu'avec les dispositions ci-dessus indiquées les allongements proportionnels de la maîtresse feuille, pour les points répondant aux extrémités de chaque étage, seraient égaux quand le ressort serait aplati. Il reste à faire voir que, dans le ressort à feuilles de même épaisseur, cette égalité de tension a lieu, quelle que soit la charge. Or on a vu précédemment qu'on a, en général, pour les différents étages :

$$\alpha = \frac{e}{2} \times \frac{Q(L-\lambda)}{M};$$

$$\alpha = \frac{e}{2}\left[\frac{M_1\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{r_1}\right)+Q(L-\lambda)}{M+M_1}\right];$$

$$\alpha = \frac{e}{2}\left[\frac{M_1\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{r_1}\right)+M_2\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{r_2}\right)+Q(L-\lambda)}{M+M_1+M_2}\right].$$

Ici la bande est négligeable et les moments d'élasticité sont tous égaux. Les formules précédentes deviennent donc :

$$\alpha = \frac{e}{2} \times \frac{Q(L-L_1)}{M};$$

$$\alpha = \frac{e}{2} \times \frac{2Q(L-L_1)}{2M} = \frac{e}{2}\,\frac{Q(L-L_1)}{M};$$

$$\alpha = \frac{e}{2} \times \frac{3Q(L-L_1)}{3M} = \frac{e}{2}\,\frac{Q(L-L_1)}{M}, \text{ etc.}$$

Ainsi les allongements proportionnels seront uniformément répartis dans la maîtresse feuille, quelle que soit la charge, et aussi dans le reste du ressort, puisque les autres feuilles ont sensiblement le même rayon de fabrication, le même rayon sous charge et la même épaisseur.

Règle des amincissements des extrémités.

Jusqu'à présent je n'ai cherché à aplatir complétement le ressort, et à égaliser les allongements proportionnels, qu'aux points répondant aux extrémités de chaque étage. Cette approximation est à la rigueur suffisante ; toutefois, si on laissait aux feuilles une épaisseur constante dans toute leur étendue, elles ne fléchiraient pas assez aux extrémités, lesquelles ne s'appliqueraient pas exactement contre la feuille supérieure, et n'éprouveraient que des tensions sensiblement nulles. Il convient donc d'amincir les extrémités des feuilles, et cela de manière à ce que le ressort s'aplatisse complétement et que les rayons de courbure puissent devenir infinis tous à la fois, au lieu de l'être seulement aux extrémités de chaque étage.

A cet effet, pour le premier étage de la maîtresse feuille, à partir de son extrémité, 2P étant la charge qui produit l'aplatissement, on devra avoir :

$$\frac{M}{r} - P(L - \lambda) = 0,$$

ou, en appelant y l'épaisseur variable, et x la distance $L - \lambda$, on a :

$$\frac{y^3}{x} = \text{constante ou } \frac{y^3}{x} = \frac{e^3}{L - L_1}.$$

On déterminera ainsi les valeurs de y répondant à celles de x. On voit par cette formule que, dès que $x > y$, y varie beaucoup plus lentement que x.

Pour le second étage on aurait :

$$\frac{M}{r} + \frac{M_1}{r_1} - P(L - \lambda) + 0,$$

ou

$$\frac{M}{r} + \frac{M}{r_1} - P(L - L_1) - P(L_1 - \lambda) = 0,$$

ou, à cause de l'équation relative au premier étage :

$$\frac{M_1}{r_1} - P(L_1 - \lambda) = 0.$$

En faisant de même l'épaisseur variable égale à y, et la distance $L_1 - \lambda$ égale à x_1, on a :

$$\frac{y^3_1}{x_1} = \text{constante} = \frac{e^3_1}{L_1 - L_2}$$

et ainsi de suite pour tous les autres étages. Si l'on a : $e = e_1 = e_2 =$ etc., et $L - L_1 = L_1 - L_2 =$ etc., les profils formant les amincissements sont identiques pour toutes les feuilles.

Il est facile de reconnaître que la forme en lame de poignard, et qui consiste à ne pas amincir les étagements, mais à réduire leur largeur en triangle satisfait également; seulement elle donne lieu à trop de déchets.

Ressorts à feuilles de même épaisseur et de même rayon. Ressorts à feuilles décrites d'un même centre et dont les épaisseurs sont légèrement croissantes.

De ce qui précède résultent deux manières d'ailleurs peu différentes de construire un ressort :

1° En formant toutes les feuilles d'épaisseurs égales et de rayons égaux, auquel cas le ressort a une très-légère bande de fabrication; 2° en traçant toutes les feuilles d'un même centre avec des rayons s'augmentant successivement des épaisseurs, et ces épaisseurs elles-mêmes augmentant légèrement du haut vers le bas, proportionnellement à ces rayons, de manière à ce qu'on ait toujours :

$$\frac{e}{2r} = \frac{e_1}{2r_1} = \frac{e_2}{2r_2} = \text{etc.} = \frac{e_n}{2r_n} = \alpha,$$

α étant l'allongement proportionnel, le ressort étant aplati. Dans ce cas, les feuilles conservent, après l'assemblage, leur flèche de fabrication. Outre cet avantage, cette seconde méthode présente encore celui que le vo-

lume est un peu plus faible que quand tous les rayons sont égaux.

Il suffit pour le voir de se reporter à la *fig.* 4. Dans ce cas, le profil extérieur du ressort aplati rentre un peu en dedans de la ligne droite ABK. qui termine le ressort à feuilles d'égale épaisseur. La démonstration est d'ailleurs tout à fait semblable à celle faite précédemment. Au reste, la différence des deux méthodes est peu de chose; cependant la différence des deux volumes est très-sensible.

Avec ces ressorts, dont les feuilles croissent légèrement du haut jusqu'en bas, on aura toujours à appliquer les formules générales. Les épaisseurs de chaque feuille se détermineront toujours par les relations :

$$\frac{e}{2r} = \frac{e_1}{2r_1} = \text{etc.} = \alpha,$$

α étant l'allongement proportionnel qu'on désire avoir quand le ressort sera aplati; les étagements se calculeront toujours d'après les formules :

$$\text{L} - \text{L}_1 = \frac{\text{M}}{\text{P}r};\ \text{L}_1 - \text{L}_2 = \frac{\text{M}_1}{\text{P}r_1};\ \text{L}_2 - \text{L}_3 = \frac{\text{M}_2}{\text{P}r_2},\ \text{etc.},$$

dans lesquelles P représente toujours la moitié de la force qui doit aplatir le ressort. Ici les étagements iront en augmentant depuis les extrémités du ressort jusqu'au centre, car ils varieront comme les quarrés des épaisseurs des feuilles.

S'il arrive que les épaisseurs augmentent de quantités trop petites pour qu'on puisse donner à toutes les feuilles les épaisseurs calculées d'après leurs rayons, on donnera à plusieurs feuilles, en partant du haut, une épaisseur commune égale à la moyenne entre leurs épaisseurs et un étagement commun, égal à la moyenne de leurs

étagements ; on fera de même pour plusieurs des feuilles suivantes, et ainsi de suite jusqu'à ce que le ressort soit terminé. Quant aux amincissements, ils se calculeront par la règle générale.

Propriété des ressorts à feuilles sensiblement de même épaisseur.

Avant de montrer comment, dans l'application, on se servira des notions précédentes pour déterminer les éléments d'un ressort, je vais exposer quelques faits relatifs aux ressorts à feuilles d'égale ou sensiblement d'égale épaisseur.

En se reportant à la *fig.* 4 et aux notations correspondantes, appelant en outre H l'épaisseur totale d'un ressort à feuilles d'égale épaisseur, on voit qu'on peut poser très-approximativement :

$$H : e :: L : l,$$

d'où

$$H = \frac{e}{l} L ;$$

mais

$$l = \frac{M}{Pr} = \frac{E\alpha}{12P} \frac{e^3}{r};$$

donc

$$H = \frac{12PLr}{E\alpha e^2}.$$

Or on a, en appelant f la flèche de fabrication du ressort :

$$r = \frac{L^2}{2f} \quad \text{et} \quad e = 2r\alpha = \frac{L^2\alpha}{f}.$$

Remplaçant r et e par ces valeurs, on a

$$H = \frac{6Pf}{E\alpha^2 aL}.$$

Si k est la flexibilité par kilogramme de poids sur chaque extrémité, on a :

$$f = kP ;$$

donc

$$H = \frac{6P^2k}{E\alpha^2 aL}.$$

On voit ainsi que, toutes choses égales d'ailleurs, l'épaisseur totale d'un ressort est proportionnelle : 1° au quarré de la charge susceptible de l'aplatir complétement, qui mesure ordinairement sa résistance absolue, ou, ce qui revient au même, au quarré de la charge susceptible de produire un même allongement ; 2° à sa flexibilité ; et que cette épaisseur totale varie en raison inverse, 1° de la largeur du ressort, 2° de sa longueur.

Il y a donc avantage, pour diminuer l'épaisseur d'un ressort, à rendre sa largeur et la longueur de la maîtresse feuille les plus grandes possibles.

Le volume V d'un ressort est HLa ; donc

$$V = \frac{6Pf}{E\alpha^2} = \frac{6P^2k}{E\alpha^4}.$$

On voit que cette expression ne dépend nullement des dimensions du ressort. On obtient ainsi ce résultat remarquable que tous les ressorts ayant la même flexibilité et la même résistance ont sensiblement le même volume, et, par suite, le même poids.

On reconnaît en même temps que, toutes choses égales d'ailleurs, le volume d'un tel ressort varie proportionnellement : 1° à sa flexibilité ; 2° au quarré de sa résistance absolue, ou plus généralement de la charge nécessaire pour l'aplatir, ou pour produire un même allongement.

Toutefois, pour que le volume ne change pas, il faut que la longueur du ressort ne dépasse pas une certaine limite. En effet, on tire facilement des formules connues :

$$\frac{l}{L} = \frac{Ea\alpha^3 L^3}{6Pf^2},$$

de sorte que, pour que le ressort soit possible avec les feuilles de l'épaisseur donnée par le calcul, il faut que

$$\frac{l}{L} \leq 1 \quad \text{ou que} \quad L \leq \sqrt[3]{\frac{6Pf^2}{E\alpha^3 a}}.$$

Or cette condition se trouve très-ordinairement remplie dans la pratique. Si cependant elle ne l'était pas, le moyen le plus simple de faire le ressort serait de le former d'une seule feuille, dont l'épaisseur se déduirait de la formule $L = \frac{M}{Pr}$. Seulement, dans ce cas, l'allongement dans l'aplatissement serait moindre que α, et le volume se trouverait aussi augmenté.

Application des notions précédentes, dans la pratique pour le calcul des ressorts à feuilles de même ou sensiblement de même épaisseur.

Je vais maintenant indiquer par quelques exemples la manière d'appliquer, dans la pratique, les notions précédentes, pour calculer les éléments d'un ressort à établir dans des circonstances quelconques.

Un cas assez fréquent est celui où l'on donne: 1° la flexibilité du ressort, c'est-à-dire ce qu'il doit perdre par 1.000 kilogrammes; 2° sa résistance absolue 2P, c'est-à-dire la charge qu'il peut supporter sans que son élasticité soit altérée; 3° la corde de fabrication $2c$ du ressort; 4° la largeur a des feuilles; 5° la charge normale 2Q du ressort. Au lieu de donner la résistance limite 2P, on pourrait donner l'allongement proportionnel α', qui correspond à la charge normale 2Q. C'est même la donnée la plus convenable, attendu qu'on sait alors à quel degré d'allongement ou de tension on fait travailler la matière. Cela revient, du reste, au même; car α étant l'allongement répondant à la limite d'élasticité et à la charge 2P, on a, d'après ce qui précède, $\alpha' : \alpha :: 2Q : 2P$; donc $\alpha' = \frac{\alpha Q}{P}$; de sorte que α' peut

se conclure de P, de même que P peut se conclure de α'.

Je suppose de plus, ce qu'on peut toujours admettre, que la limite de résistance du ressort, qui a lieu sous la charge 2P, corresponde à l'aplatissement du ressort. Plus loin j'exposerai ce qu'il faudrait faire s'il n'en était pas ainsi, et, effectivement, certaines raisons font quelquefois préférer que l'aplatissement ait lieu sous la charge 2Q elle-même, ou même sous une charge différente de 2P et de 2Q.

De même, au lieu de donner la corde de fabrication, on pourrait donner la corde sous charge; la question se résoudrait tout aussi facilement, comme on le verra plus loin dans un problème relatif à un autre genre de ressorts.

Je reviens maintenant aux données telles qu'elles ont été d'abord posées.

Si l'on veut que les rayons et les épaisseurs des feuilles soient rigoureusement égaux, voici comment l'on procédera : connaissant la flexibilité du ressort, on sait la quantité i qu'il doit perdre sous la charge normale 2Q; connaissant sa résistance absolue 2P, qui répond à l'aplatissement du ressort, et pour laquelle on supposera un allongement proportionnel au plus égal à celui qui a lieu à la limite d'élasticité, on saura quelle doit être la flèche de fabrication, car on a :

$$f : i :: P : Q, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{P}{Q} i.$$

On aura donc la demi-longueur de la maîtresse feuille :

$$L = \sqrt{c^2 + f^2}.$$

Par suite, le rayon de fabrication

$$r = \frac{L^2}{2f}, \quad \text{ou} \quad r = \frac{c^2 + f^2}{2f};$$

ensuite l'épaisseur

$$e = 2r\alpha,$$

α étant l'allongement proportionnel, qui doit avoir lieu dans le ressort aplati, sous l'action de la force 2P. On a donc :

$$e = \frac{(c^2 + f^2)\alpha}{f}.$$

L'étagement

$$l = \frac{M}{Pr}.$$

Donc

$$l = \frac{Eae^3}{12Pr}$$

ou

$$l = \frac{Eae^3 f}{6P(c^2 + f^2)}.$$

Enfin on formera les amincissements d'après la loi déjà indiquée.

Les autres feuilles s'obtiendront immédiatement, puisqu'on connaît la première et l'étagement.

Leur nombre sera représenté par le quotient $\frac{L}{l}$. Toutefois on pourra souvent supprimer au moins la dernière feuille, quand elle sera débordée par la bride qui pourra en tenir lieu. Le ressort se trouve ainsi complétement déterminé.

Des ressorts pour quinze wagons à balast ont été construits de cette manière dans les ateliers de M. Bergès pour le chemin de fer de l'Ouest. Ils devaient porter une charge normale maxima de 2.000 kilogrammes, et perdre sous ce poids $0^m,055$; leur résistance absolue

correspondant à l'aplatissement complet devait être de 4.545 kilogrammes ; la corde de fabrication devait être de $0^m,950$, et la largeur des feuilles de $0^m,075$.

Le calcul donna pour la flèche de fabrication $0^m,125$; pour l'épaisseur des feuilles, tout près de $0^m,010$; on prit $0^m,010$; pour le rayon de fabrication $0^m,965$; pour l'étagement $0^m,057$. Le ressort s'est ainsi trouvé composé de huit feuilles ayant les longueurs suivantes :

		mèt.
1re	=	1,004
2e	=	0,890
3e	=	0,776
4e	=	0,662
5e	=	0,548
6e	=	0,434
7e	=	0,320
8e	=	0,206

Les amincissements furent faits d'après la règle générale.

Les ressorts éprouvés à 2.000 kilogrammes perdirent $0^m,055$ à 1 ou 2 millimètres près ; ils s'aplatirent rigoureusement sous 4.500 kilogrammes, et après l'enlèvement de la charge reprirent exactement leur forme primitive. Ils pesaient 26 kilogrammes.

Il a été également construit pour le chemin de fer du Nord 180 ressorts de suspension pour voitures à voyageurs. Ils devaient porter une charge normale maxima de 1.000 kilogrammes, et perdre sous ce poids $0^m,100$; la largeur des feuilles devait être de $0^m,075$.

Le calcul donna, pour la flèche de fabrication, $0^m,100$; pour l'épaisseur des feuilles, $0^m,010$; pour le rayon de fabrication, 3 mètres ; pour l'étagement, $0^m,0833$.

Le ressort s'est ainsi trouvé composé de neuf feuilles ayant les longueurs suivantes :

	mèt.
1re =	1,550
2e =	1,384
3e =	1,217
4e =	1,050
5e =	0,883
6e =	0,716
7e =	0,550
8e =	0,384
9e =	0,217

Les amincissements furent faits d'après la règle générale.

Les ressorts éprouvés à 1.000 kilogrammes perdirent $0^m,10$ à 1 millimètre près, et, après l'enlèvement de la charge, reprirent exactement leur forme primitive. Ils pesaient $44^k,25$.

Plusieurs autres garnitures de ressorts de suspension pour voitures à voyageurs, également pour le chemin de fer du Nord, ont été construites. Ces ressorts devaient s'aplatir sous 900 kilogrammes, et avoir une flexibilité de $0^m,0103$ par 100 kilogrammes, la même largeur de feuille $0^m,075$ étant conservée. Leur longueur devait être $1^m,25$.

Le calcul donna, pour la flèche de fabrication, $0^m,093$; pour l'épaisseur des feuilles, $0^m,007$; pour l'étagement, $0^m,0453$, ce qui donne treize feuilles.

Ces ressorts ont rempli les conditions demandées.

Enfin on a construit, pour le chemin de l'Ouest, deux garnitures de ressorts pour tenders à marchandises. Ces tenders étant à quatre roues seulement, la charge normale de ces ressorts est de 3.500 à 4.000 kilogrammes. La flexibilité devait être de $0^m,010$ par

1.000 kilogrammes. Sous 4.500 kilogrammes, ils ont perdu tous de $0^m,044$ à $0^m,046$ de leur flèche ; ils ont été aplatis par balancement.

Les dimensions données par le calcul furent les suivantes : l'épaisseur des feuilles $0^m,011$, la largeur des feuilles $0^m,080$, le nombre de feuilles 11, la flèche de fabrication $0^m,085$, l'étagement $0^m,036$; les longueurs développées des feuilles furent :

	mèt.
1re =	0,922
2e =	0,850
3e =	0,778
4e =	0,706
5e =	0,634
6e =	0,562
7e =	0,490
8e =	0,418
9e =	0,346
10e =	0,274
11e =	0,202

Ces ressorts ont également rempli les conditions demandées : ils pesaient $42^k,50$.

Si l'on veut que les feuilles soient décrites d'un même centre, avec des rayons s'augmentant successivement des épaisseurs, le problème se résout aussi facilement.

On calculera toujours la demi-longueur, le rayon, l'épaisseur et l'étagement de la maîtresse feuille par les formules :

$$L = \sqrt{c^2 + f^2}; \quad r = \frac{L^2}{2f}; \quad e = 2r\alpha \quad \text{et} \quad l = \frac{Pr}{M}.$$

On déterminera ensuite l'épaisseur et le rayon de la seconde feuille par les équations :

$$r_1 = r + \frac{e + e_1}{2} \quad \text{et} \quad \frac{e_1}{r_1} = \frac{e}{r} = 2\alpha,$$

qui donnent

$$e_1 = \frac{e(2r + e)}{2r - e};$$

puis

$$r_1 = \frac{e_1}{2a}.$$

On a ensuite

$$l_1 = \frac{M_1}{Pr_1}.$$

On trouve de même

$$e_2 = \frac{e_1(2r_1 + e_1)}{2r_1 - e_1}; \quad r_2 = \frac{e_2}{2a}; \quad l_2 = \frac{M_2}{Pr_2};$$

et ainsi de suite.

Toutes les feuilles du ressort seront ainsi déterminées.

Valeur des coefficients numériques. Dans les applications, j'ai admis comme coefficient de l'élasticité de l'acier, le nombre 20.000.000.000, qui est celui résultant unanimement des expériences de MM. Poncelet, Morin, Ardant et autres observateurs.

Toutes les flèches que j'ai calculées, pour des ressorts en acier fondu ou corroyé, se sont très-bien accordées avec ce coefficient, et j'ai vérifié d'ailleurs qu'une différence assez faible supposée sur le coefficient changeait la flexibilité d'une manière sensible.

Quant à la limite d'allongement, j'ai admis qu'on pouvait aller jusqu'à $0^m,005$ comme limite extrême. Les nombreuses observations de M. Lasalle, ingénieur, dirigeant les ateliers de M. Bargès, lui ont fait reconnaître qu'une lame d'acier ayant pour épaisseur le centième du rayon pouvait être rectifiée, et qu'elle reprenait ensuite complétement sa forme primitive. Or la formule $\frac{e}{2r} = \alpha$ donne alors $\alpha = 0,005$. J'ajouterai que dans certains ressorts, par exemple, ceux des wagons à marchandises du chemin de fer de Lyon, la charge

d'épreuve à laquelle on les soumet y détermine des allongements même un peu plus forts sans qu'ils cessent de reprendre leur forme primitive. Toutefois les expériences faites dans ces derniers temps par M. Wertheim, et celles que j'ai entreprises au chemin de fer du Nord (*voir* chapitre III), me font regarder comme prudent de ne faire travailler l'acier sous la charge normale qu'à des allongements généralement compris entre $0^m,002$ et $0^m,003$. Pour de bons aciers, $0^m,0025$ me paraît une limite convenable et parfaitement sûre (*voir* pour plus de détails le chapitre III).

Ressorts dont la limite de résistance a lieu soit au-dessous, soit au-dessus de l'horizontale.

J'ai supposé, dans les exemples précédents, que la résistance extrême du ressort, ainsi que la limite de ses allongements, répondaient à son aplatissement complet; mais, comme je l'ai dit d'ailleurs, cette supposition n'est pas nécessaire.

En effet, les principes généraux qui servent de base au calcul des ressorts font connaître leurs éléments en fonction de α et de P, α et P étant l'allongement et la résistance qui ont lieu quand le ressort est aplati, que cet allongement et cette résistance soient d'ailleurs égaux, supérieurs ou inférieurs à ceux qui correspondent aux limites du ressort. Il suffit donc de connaître α et P. Or c'est ce qui sera toujours possible, lors même que ces quantités ne seraient pas données immédiatement. Ainsi, par exemple, supposons qu'on donne la flexion extrême u, au-dessous ou au-dessus de l'horizontale, que le ressort ne devra pas dépasser, ainsi que la position du ressort sous la charge normale 2Q, par rapport à l'horizontale, u étant positif s'il est au-dessous de l'horizontale, et négatif s'il est au-dessus. On connaîtra alors immédiatement f, et on aura P par la proportion :

$$P : Q :: f : i.$$

Si l'on appelle α l'allongement proportionnel répondant à la limite d'élasticité de l'acier, on déterminera α par la proportion :

$$\alpha : \alpha' :: f : f + u.$$

Cette proportion suppose que les allongements en un même point sont entre eux comme les flexions correspondantes. C'est ce qu'il est facile de prouver. En effet, pour l'étage de la maîtresse feuille qui se trouve au-dessus de $k + 1$ feuilles, on a, sous une charge 2Q :

$$\alpha = \frac{e}{2}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho}\right)$$

et

$$\frac{1}{\rho} = \frac{k\frac{M}{r} - Q(L - \lambda)}{kM}$$

ou

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{r} - \frac{Q(L - \lambda)}{kM};$$

donc

$$\alpha = \frac{Qe(L - \lambda)}{2kM},$$

ce qui montre que α est proportionnel à Q.

Si au lieu de donner la flexion extrême du ressort, au-dessous ou au-dessus de l'horizontale, on donnait directement sa résistance limite 2S, la question se résoudrait d'une manière analogue ; on aurait :

$$S : Q :: f + u : i.$$

On tirerait de là $f + u$, et par suite u, et la question se trouverait ramenée au problème précédent.

Au reste, un moyen encore plus simple de résoudre la question est de calculer le ressort comme si sa limite de résistance correspondait à l'horizontale ; puis sim-

plement de changer sa flèche et son rayon de fabrication, de manière à ce que cette limite de résistance corresponde à la position voulue.

En effet, il est facile de démontrer que, pourvu que les données fussent les mêmes, on retrouverait les mêmes dimensions pour chaque feuille et le même nombre de feuilles, et que leur courbure seule changerait. En effet, on a, en général :

$$e = 2r\alpha;$$

mais on a très-approximativement

$$r = \frac{L^2}{2f};$$

donc

$$e = \frac{L^2\alpha}{f};$$

mais

$$f : i :: P : Q;$$

donc

$$f = \frac{Pi}{Q} \quad \text{et} \quad e = \frac{L^2Q}{i} \times \frac{\alpha}{P}.$$

Or, f est la flèche de fabrication ; α est l'allongement proportionnel du ressort aplati, et ce ressort ayant une flexibilité donnée $\frac{\alpha}{P}$ est constant, quelle que soit la flèche f de fabrication ; d'ailleurs L est sensiblement constant ; il en est donc de même de e ; on tombera donc sur la même épaisseur de feuille, quelle que soit la flèche de fabrication, ou, par suite, le rayon de courbure. L'étagement est :

$$\frac{M}{Pr} = \frac{2M}{L^2}\frac{f}{P}.$$

Or, quelle que soit f, P étant la charge nécessaire pour

aplatir le ressort, dont la flexibilité est donnée; $\frac{l}{P}$ est constant. L'étagement sera donc toujours le même. Il résulte de là que le même ressort satisfait aux mêmes conditions de flexibilité et de résistance absolue, quel que soit du reste le cintre ou le rayon de fabrication qu'on donne aux feuilles. Ainsi on peut déterminer le ressort de manière que sa limite de résistance corresponde à son aplatissement, puis le courber en fabrication plus ou moins, il satisfera toujours à la question.

Remarque sur les ressorts de suspension des machines locomotives dont les extrémités sont traversées par des boulons, qui les relient au châssis.

Il est une autre remarque qui se rapporte aux ressorts de suspension des machines locomotives. Quand ces ressorts sont terminés par des rouleaux aux extrémités de la maîtresse feuille, ils se calculent d'après les règles ordinaires. Mais souvent ils sont reliés au châssis par de forts boulons qui traversent les extrémités du ressort. Dans ce cas, il y a lieu de faire les observations suivantes. J'admettrai seulement que dans ce dernier cas la maîtresse feuille, comme cela se pratique maintenant, est munie, de part et d'autre du trou par lequel passe le boulon, de deux mamelons, destinés à reporter la pression, transmise par l'écrou, dans la section qui correspond à l'axe du boulon (voir les *fig.* 5 et 6).

Cela posé, on aura toujours pour l'étagement répondant à la maîtresse feuille :

$$l = \frac{M}{Pr} \quad \text{ou} \quad l = \frac{2M\alpha}{Pe};$$

α étant l'allongement répondant à la charge 2P. Si l'étagement l est plus grand que le rayon *ob* du boulon de suspension, et si la différence est assez grande pour permettre le glissement des feuilles; alors, sous la réserve d'une condition qui va être exprimée un peu

plus loin, et qui est relative à ce qui se passe dans les sections de la maîtresse feuille qui traversent le trou du boulon, on terminera le ressort d'après les règles ordinaires, et le boulon ne devra traverser que la maîtresse feuille. Mais, si l est plus petit que ob, ou si étant plus grand que ob il n'est pas assez grand pour permettre le glissement des feuilles, alors le boulon doit traverser au moins une feuille de plus que la maîtresse feuille. Si l'on donne à toutes les feuilles traversées ainsi par le boulon la même épaisseur et le même rayon qu'à la maîtresse feuille, et si n est leur nombre, y compris la maîtresse feuille, l'étagement correspondant à leur ensemble sera :

$$\frac{nM}{Pr} = \frac{2nM\alpha}{Pe},$$

puisqu'on aura toujours pour leur ensemble :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{nM}{r} - Q(L - \lambda)}{nM},$$

et

$$\alpha = \frac{e}{2}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho}\right) = \frac{e}{2}\frac{Q(L - \lambda)}{nM}.$$

Or, $\frac{nM}{Pr} = \frac{2nM\iota}{Pe}$ n'est autre chose que n fois l'étagement l répondant à une seule feuille. On déterminera donc le nombre n des feuilles traversées par le boulon par la condition que n fois l'étagement l surpasse suffisamment le rayon ob du boulon pour permettre le glissement des feuilles. Généralement une ou deux feuilles suffiront.

Reste à examiner la seconde condition dont j'ai parlé ci-dessus, et qui est relative à ce qui se passe dans les sections qui traversent le trou du boulon.

Soit, par exemple, la section KK′ (*fig.* 7). En désignant toujours par n le nombre des feuilles traversées par le boulon, et par m le moment d'élasticité de la section KK′, on a pour cette section :

$$\alpha = \frac{e}{2}\frac{Q(L-\lambda)}{nm}.$$

Or, sous la charge 2Q, il faut que l'allongement α ne dépasse pas celui qui a été assigné d'avance et qui est $\frac{e}{2}\frac{Qnl}{nM}$, au point où commence la première feuille qui suive les n feuilles traversées par le boulon. Il faut donc que $\frac{2}{e}\frac{Q(L-\lambda)}{nm}$ ne surpasse pas $\frac{e}{2}\frac{Qnl}{nM}$. Or m et M sont entre eux comme KA + BK′ est à II′ $= a$, et d'ailleurs $L - \lambda = CD$. Il faut donc, en résumé, que $\frac{CD}{a-AB}$ ne soit pas plus grand que $\frac{nl}{a}$, qui est le rapport correspondant à l'étagement de l'ensemble des n feuilles, rapport dont la valeur est connue et que je désigne par δ,

Ainsi on doit avoir :

$$\frac{CD}{a - AB} \leqq \delta.$$

Mais si on pose l'angle ICA $= \theta$, et que l'on désigne par u le rayon CA du boulon, on a :

$$CD = u \sin\theta \quad \text{et} \quad AB = 2u \cos\theta.$$

Donc l'inégalité ci-dessus revient à :

$$\frac{u \sin\theta}{a - 2u\cos\theta} \leqq \delta.$$

En cherchant le maximum de $\frac{u \sin \theta}{a - 2u \cos \theta}$, on trouve qu'il répond à $\cos \theta = \frac{2u}{a}$. En substituant dans l'inégalité ci-dessus, celle-ci devient :

$$\frac{u}{\sqrt{a^2 - 4u^2}} \leqq d.$$

Si cette condition n'était pas satisfaite, on mettrait plus de feuilles traversées par le boulon, jusqu'à ce qu'elle le devienne ; mais généralement elle se trouvera satisfaite de suite.

Les considérations qui précèdent sur les ressorts de suspension des locomotives, dont les extrémités sont traversées par des boulons, sont applicables, tant au type de ressort à feuilles de même épaisseur qu'à ceux qui seront détaillés plus loin.

On voit par ce qui précède comment l'on peut, dans tous les cas, calculer les éléments d'un ressort à feuilles de même épaisseur, ou, ce qui revient presque au même, mais donne un peu moins de volume, un ressort à feuilles sensiblement de même épaisseur, les feuilles, dans ce dernier cas, étant décrites d'un même centre, au lieu de l'être avec des rayons égaux.

Il est facile de voir qu'avec un ressort de l'une ou de l'autre espèce, les feuilles ne doivent pas bâiller. Appliquons pour cela les règles précédemment posées.

Prenons d'abord la formule (a_1). On peut très-approximativement remplacer $\rho + \varepsilon$ par ρ et écrire :

$$\int_{\lambda}^{L_2} p dl = -\frac{d}{d\lambda}\left[M_1\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\rho}\right)\right].$$

Or, dans l'intervalle de L_2 à L_1, on a :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{M}{r} + \frac{M_1}{r} - Q(L - \lambda)}{M + M_1} = \frac{1}{r} - \frac{Q(L - \lambda)}{M + M_1},$$

où M est constant, et M_1 variable, à cause des amincissements.

Donc
$$\int_{\lambda}^{L_1} pdl = -\frac{d}{d\lambda}\left[M_1 \frac{Q(L-\lambda)}{M+M_1}\right],$$
mais on a
$$M = Pr(L - L_1) \quad \text{et} \quad M_1 = Pr(L_1 - \lambda);$$
d'où
$$M + M_1 = Pr(L - \lambda).$$
Substituant, on a
$$\int_{\lambda}^{L_1} pdl = -\frac{d}{d\lambda}\left[Q(L_1 - \lambda)\right] = Q.$$

Ainsi la résultante des pressions qui ont lieu entre λ et L_1 est indépendante de λ, et égale à Q. Ces pressions se réduisent donc à une seule égale à Q et appliquée en L_1, c'est-à-dire précisément à l'extrémité de la seconde feuille.

En continuant absolument de même à l'aide des formules (a_2), (a_3), etc., on arrive à ce résultat que, dans dans le cas du ressort dont il s'agit, chaque feuille n'éprouve de pression qu'à ses deux extrémités, et que la pression qu'elle éprouve à chacune de ses extrémités est moitié de la charge; on reconnaît enfin, par les valeurs de ϖ, ϖ_1, ϖ_2, etc., que les feuilles s'appliquent exactement les unes contre les autres, sans pression sensible, mais aussi sans bâiller, ce qui est conforme à l'expérience.

Une fois un ressort à feuilles de même épaisseur calculé, ce qui se fait, comme on voit, très-simplement, il est très-facile de le modifier d'une infinité de manières, en satisfaisant aux mêmes conditions de flexibilité et de résistance, et sans changer sensiblement son volume.

En effet, supposons qu'on veuille faire un ressort qui s'aplatisse sous la charge 2Q, laquelle peut être ou ne pas être la charge normale; qu'il ait *à ce moment-là* une flexibilité répondant à une flexion i pour 2Q kilogrammes; et, de plus, que les feuilles qui le composent aient des épaisseurs, ou les mêmes ou différentes, mais que dans l'aplatissement toutes éprouvent un même allongement α. Il est clair qu'en supposant les feuilles réunies de manière à ce qu'elles ne puissent se séparer, si on enlève la charge 2Q, le ressort se relèvera d'une quantité égale à i, et dans cet état, toutes les feuilles étant jointives, sa flexibilité sera constante, comme cela a été démontré. D'après cela, pour ce ressort de suspension, le choc nécessaire pour lui faire perdre i serait, comme on l'a vu, Qi. Ainsi, le ressort devra pouvoir toujours amortir le choc Qi, de quelque manière qu'on le construise. Il résulte de là que son volume devra toujours être le même; du moins, en négligeant la perte de travail nécessaire pour mettre les feuilles en contact, depuis leur position de fabrication, perte qui est généralement très-peu de chose.

Ressorts à feuilles d'épaisseurs décroissantes ou croissantes, mais qui toutes éprouvent un même allongement, lorsque le ressort est aplati.

De là résulte un moyen de construire une infinité de ressorts de ce genre équivalents entre eux.

Il suffit pour cela : 1° que l'allongement final α de toutes les feuilles soit le même; 2° que 2P étant la charge répondant à l'aplatissement, les étagements soient calculés par les formules :

$$L - L_1 = \frac{M}{Pr},$$

$$L_1 - L_2 = \frac{M_1}{Pr_1},$$

Etc.

et 3° que le volume du ressort soit le même. Il devra nécessairement en résulter, comme conséquence, que

la flexibilité du ressort devra se trouver sensiblement la même ; ce qu'il sera facile de vérifier avec la formule générale de la flexion, ou encore au moyen de l'épure.

Quant à la charge 2P, répondant à l'aplatissement, il y a, comme on le verra un peu plus loin, avantage, quand les épaisseurs des feuilles ne sont pas toutes les mêmes, à ce que cette charge 2P soit la charge normale.

Ces diverses conditions se remplissent d'une foule de manières différentes, très-facilement, comme il est facile de s'en assurer. Celle relative au volume s'obtient en s'arrangeant de manière que la section longitudinale du ressort ait une surface déterminée, celle du ressort à feuilles de même épaisseur qu'on a d'abord calculée ; ce qui se réalise, soit directement par quelques tâtonnements fort simples, soit encore par le moyen suivant.

Ayant déterminé un certain nombre de feuilles formant la surface ABCD (*fig.* 8), il manque encore une surface S. Si on veut former le reste du ressort en feuilles toutes de même épaisseur, elles répondront dans l'aplatissement à un triangle rectiligne CDG, dont la surface doit être S. Appelons e_i et l_i l'épaisseur des feuilles et l'étagement qui sont encore inconnus ; on les déterminera comme il suit : connaissant $CD = L_i$ et la surface S, on connaîtra $DG = H$; on aura donc :

$$e_i : l_i :: H : L_i,$$

d'où

$$\frac{e_i}{l_i} = \frac{H}{L_i}.$$

Mais

$$l_i = \frac{M_i}{Pr_i} = \frac{2M_i a}{Pe_i};$$

donc

$$l_i = \frac{\mathrm{E}a\alpha}{6\mathrm{P}} e_i^2.$$

Cette équation, jointe à $\frac{e_i}{l_i} = \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{L}_i}$, suffit pour déterminer l_i et e_i. Mais on peut faire plus simplement. On a :

$$\frac{e_i}{l_i} = \frac{6\mathrm{P}}{\mathrm{E}a\alpha} \frac{1}{e_i}.$$

En appelant e et l les quantités correspondantes d'une quelconque des autres feuilles du ressort, on a de même :

$$\frac{e}{l} = \frac{6\mathrm{P}}{\mathrm{E}a\alpha} \frac{1}{e};$$

donc

$$\frac{e_i}{l_i} : \frac{e}{l} :: \frac{1}{e_i} : \frac{1}{e} :: e : e_i.$$

proportion qui fera connaître e_i. Si l'approximation n'était pas suffisante, on augmenterait ou on diminuerait un peu l'épaisseur de manière à avoir la surface cherchée. Une fois le ressort déterminé, on vérifiera la flexion par la formule générale. Si l'on n'a pas tout à fait la flexion voulue, on augmentera ou on diminuera un peu l'épaisseur des dernières feuilles.

Une première précaution est nécessaire à indiquer.

Soit ABC (*fig.* 9) le profil se rapportant au ressort à feuilles, toutes de même épaisseur; soient e et l les quantités correspondantes; soient e_i et l_i les mêmes quantités pour la première feuille d'un ressort équivalent, fait en feuilles d'épaisseurs toutes ou en partie croissantes, et dont le profil AD, dans l'aplatissement, est, comme on sait, convexe; soient e_k et l_k les mêmes quantités pour la première feuille d'un ressort équiva-

lent fait en feuilles d'épaisseurs toutes ou en partie décroissantes, et dont le profil AE, dans l'aplatissement, est comme on sait concave; soient enfin $2P$, $2P_i$ et $2P_k$ les charges statiques nécessaires pour produire, dans ces différents cas, l'aplatissement.

Dans le cas où les feuilles ont des épaisseurs croissantes, le profil du ressort est convexe; donc, pour que la surface ABD soit égale à ABC, il faut que la courbe AD, en partant du point A, soit en dehors de la droite AC, ou que l'on ait :

$$\frac{e_i}{l_i} > \frac{e}{l},$$

mais

$$\frac{e_i}{l_i} = \frac{6P}{E a \alpha}\frac{1}{e_i} \quad \text{et} \quad \frac{e}{l} = \frac{6P}{E a \alpha}\frac{1}{e}.$$

On doit donc avoir

$$\frac{P}{e_i} > \frac{P}{e} \quad \text{ou} \quad e_i < \frac{P_i}{P}e.$$

L'épaisseur de la première feuille devra donc être inférieure à la limite ci-dessus.

On verrait absolument de même que, dans le cas où les épaisseurs des feuilles décroissent, on doit avoir :

$$e_k > \frac{P_k}{P}e.$$

J'ai dit que dans ces ressorts il y avait, comme je le ferai voir, avantage à ce que l'aplatissement ait lieu sous la charge normale; alors on a : $P = P_i = P_k$, et les conditions précédentes deviennent simplement : $e_i < e$, et $e_k > e$. C'est-à-dire que, quand les feuilles ont des épaisseurs croissantes, l'épaisseur de la maîtresse feuille doit être moindre que celle des feuilles

du ressort à feuilles de même épaisseur, et que, quand les feuilles ont des épaisseurs décroissantes, l'épaisseur de la maîtresse feuille doit être plus grande que celle des feuilles du ressort à feuilles de même épaisseur.

Il a été fait d'après cette méthode, pour le chemin de fer de l'Ouest, trois garnitures de ressorts de suspension pour wagons à marchandises. Le type n° 1, à feuilles d'égale épaisseur, était composé de dix feuilles d'une épaisseur de $0^m,009$; la flexion devait être de $0^m,026$ par 1000 kilogrammes. À l'épreuve, la flexion a varié de 26 millimètres à $27^{mm},25$. Le type n° 2, à feuilles d'épaisseurs décroissantes, était composé de trois feuilles de 10 millimètres, de trois feuilles de 9 millimètres et de quatre feuilles de 8 millimètres, en tout dix feuilles; la flexion devait être de $0^m,024$ par 1.000 kilogrammes. A l'épreuve elle a varié de $23^{mm},75$ à $25^{mm},5$. Ce ressort pesait $1^k,9$ de moins que les types 1 et 3. Le type n° 3, à feuilles d'épaisseurs croissantes, était composé de deux feuilles de 8 millimètres, de trois feuilles de 9 millimètres, et de quatre feuilles de 10 millimètres, en tout neuf feuilles; la flexion, qui devait être de $0^m,025$, a varié, à l'épreuve, de 0,025 à 0,027.

Je vais d'ailleurs faire voir que les ressorts de cette espèce ne bâillent pas quand ils sont aplatis, ce qui conduit, comme je l'ai annoncé, à les disposer de manière à ce que l'aplatissement ait lieu sous la charge normale, outre qu'alors l'allongement éprouvé sous la charge normale est le même pour toutes les feuilles. Pour cela, je vais examiner dans quel cas un ressort quelconque bâille ou ne bâille pas.

A cet effet, appliquons la règle générale et conser-

vons les notations habituelles. J'examine d'abord ce qui se passe dans le second étage de la maîtresse feuille dans l'intervalle $L_1 L_2$ entre cette feuille et la deuxième. Il faut donc chercher le signe de

$$\frac{d^2}{d\lambda^2}\left[M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{\rho}\right)\right].$$

Or, si l'on remplace $\frac{1}{\rho}$ par sa valeur

$$\frac{\frac{M}{r}+\frac{M_1}{r_1}-Q(L-\lambda)}{M+M_1},$$

puis M par $Pr(L-L_1)$, et M_1 par $Pr_1(L_1-\lambda)$, il vient, toutes réductions faites :

$$M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{\rho}\right)=(L_1-\lambda)\left[Q+(P-Q)\frac{(r-r_1)(L-L_1)}{r(L-L_1)+r_1(L_1-\lambda)}\right]$$

Si l'on différentie une première fois, on a :

$$(a_1)\qquad \int_\lambda^{L_1} pdl=-\frac{d}{d\lambda}\left[M_1\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{\rho}\right)\right]=$$

$$=Q+(P-Q)\frac{r(r-r_1)(L-L_1)^2}{[r(L-L_1)+r_1(L_1-\lambda)]^2}.$$

Si l'on fait $\lambda=L_1$, on a, pour la pression exercée au point L_1 lui-même, c'est-à-dire juste à l'extrémité de la deuxième feuille :

$$\int_{L_1}^{L_1} pdl=Q+(P-Q)\left(\frac{r-r_1}{r}\right).$$

Si les feuilles ont des épaisseurs décroissantes, et, par suite, des rayons décroissants, on voit que la pression

exercée à l'extrémité de la deuxième feuille est plus grande que la charge, tant que celle-ci est inférieure à celle qui produit l'aplatissement, et que le contraire a lieu au delà de l'aplatissement.

On reconnaît de la même manière que l'inverse a lieu lorsque les feuilles ont des épaisseurs croissantes ; c'est-à-dire que l'extrémité de la deuxième feuille, d'abord séparée de la première, s'en rapproche de plus en plus à mesure que la charge augmente, pour se mettre en contact, lorsqu'on a :

$$\frac{Q}{P-Q} = \frac{r_1 - r}{r}$$

et que cette pression continue à croître à mesure que la charge augmente, même au delà de l'aplatissement.

Si l'on différentie une seconde fois (a_1), on a :

$$(b_1) \quad \varpi = \frac{d^2}{d\lambda^2}\left[M_1\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{\rho}\right)\right] = 2(P-Q)\frac{rr_1(r_1 - r)(L - L_1)^2}{[r(L-L_1)+r_1(L_1-\lambda)]^3}$$

Supposons d'abord que les feuilles aient des épaisseurs décroissantes ; alors $r_1 < r$, et tant que $Q < P$, ϖ est négatif. Ainsi, avant l'aplatissement, un ressort de cette espèce doit bâiller dans l'intervalle du premier étage, entre la première et la deuxième feuilles. Quand $Q = P$, on a $\varpi = 0$, et enfin quand $Q > P$, c'est-à-dire au-dessous de l'aplatissement, on a $\varpi > 0$; par conséquent il y a contact intime.

Au contraire, si les feuilles ont des épaisseurs croissantes, alors $r_1 > r$, et tant que $Q < P$, ϖ est positif, de sorte que, avant l'aplatissement, le contact est intime ; et quand $Q > P$, c'est-à-dire au-dessous de l'aplatissement, ϖ est négatif, c'est-à-dire que le ressort doit bâiller.

Passons maintenant au second intervalle $L_1 L_2$. Pour

savoir ce qui se passe entre la deuxième et la troisième feuilles, dans cet intervalle, il faut chercher le signe de

$$\frac{d^2}{d\lambda^2}\left[M_2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{\rho}\right)\right].$$

Or on a

$$\frac{1}{\rho}=\frac{\frac{M}{r}+\frac{M_1}{r_1}+\frac{M_2}{r_2}-Q(L-\lambda)}{M+M_1+M_2};$$

puis

$$M = Pr(L-L_1)$$
$$M_1 = Pr_1(L_1-L_2)$$
$$M_2 = Pr_2(L_2-\lambda).$$

En remplaçant et réduisant, on a :

$$M_2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{\rho}\right)=(L_2-\lambda)\left[Q+(P-Q)\frac{(r-r_2)(L-L_1)+(r_1-r_2)(L_1-L_2)}{r(L-L_1)+r_1(L_1-L_2)+r_2(L_2-\lambda)}\right].$$

En différentiant une première fois, on a :

$$(a_2)\qquad \int_\lambda^{L_2} p_2\,dl=-\frac{d}{d\lambda}\left[M_2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{\rho}\right)\right]=$$

$$=Q+(P-Q)\frac{[(r-r_2)(L-L_1)+(r_1-r_2)(L_1-L_2)][r(L-L_1)+r_1(L_1-L_2)]}{[r(L-L_1)+r_1(L_1-L_2)+r_2(L_2-\lambda)]^2}.$$

Si l'on fait, dans cette formule, $\lambda=L_2$, on a, pour la pression exercée au point L_2, c'est-à-dire juste à l'extrémité de la troisième feuille,

$$\int_{L_1}^{L_2} p_2\,dl=Q+(P-Q)\frac{[(r-r_2)(L-L_1)+(r_1-r_2)(L_1-L_2)]}{r(L-L_1)+r_1(L_1-L_2)}.$$

On peut faire ici une remarque analogue à celle faite plus haut. Ainsi, si les feuilles ont des épaisseurs décroissantes, la pression qui a lieu entre l'extrémité de la troisième feuille et la deuxième feuille est plus grande que la charge tant que le ressort n'est pas aplati et devient ensuite plus faible que la charge. Au contraire, quand les feuilles ont des épaisseurs croissantes, cette

pression est moindre que la charge, tant que le ressort n'est pas aplati, et au delà elle devient supérieure à la charge.

En différentiant une seconde fois, on a

$$(b_2)\quad \varpi_1 = 2(\mathrm{P}-\mathrm{Q})\frac{r_2[r(\mathrm{L}-\mathrm{L}_1)+r_1(\mathrm{L}_1-\mathrm{L}_2)][(r_2-r)(\mathrm{L}-\mathrm{L}_1)+(r_2-r_1)(\mathrm{L}_1-\mathrm{L}_2)]}{[r(\mathrm{L}-\mathrm{L}_1)+r_1(\mathrm{L}_1-\mathrm{L}_2)+r_2(\mathrm{L}_2-\lambda)]^3}.$$

Supposons encore que les feuilles aient des épaisseurs décroissantes. L'expression ci-dessus fait voir que, tant que $\mathrm{Q} < \mathrm{P}$, comme $r_2 < r$ et que $r_2 < r_1$, il s'ensuit que $\varpi_1 < 0$. Ainsi, avant l'aplatissement, le ressort doit bâiller entre la deuxième et la troisième feuilles, dans l'intervalle $\mathrm{L}_2\mathrm{L}_3$. Quand $\mathrm{Q}=\mathrm{P}$, on a $\varpi_1 = 0$, et enfin quand $\mathrm{Q} > \mathrm{P}$, ϖ devient positif, c'est-à-dire que le contact devient intime.

Au contraire, si les feuilles ont des épaisseurs croissantes, on voit que le contact est intime avant l'aplatissement et que le ressort bâille au delà.

Voyons encore ce qui se passe, dans le même intervalle, $\mathrm{L}_2\mathrm{L}_3$, mais entre la première et la deuxième feuilles. Or on a pour une valeur quelconque de λ, comprise entre L_2 et L_3,

$$\int_\lambda^{\mathrm{L}_0} p\,dl = -\frac{d}{d\lambda}\left[\mathrm{M}_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{\rho}\right)\right]-\frac{d}{d\lambda}\left[\mathrm{M}_2\left(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{\rho}\right)\right].$$

Remplaçant $\frac{1}{\rho}$ par sa valeur

$$\frac{\frac{\mathrm{M}}{r}+\frac{\mathrm{M}_1}{r_1}+\frac{\mathrm{M}_2}{r_2}-\mathrm{Q}(\mathrm{L}-\lambda);}{\mathrm{M}+\mathrm{M}_1+\mathrm{M}_2}$$

puis

$$\mathrm{M} \text{ par } \mathrm{P}r(\mathrm{L}-\mathrm{L}_1);$$
$$\mathrm{M}_1 \text{ par } \mathrm{P}r_1(\mathrm{L}_1-\mathrm{L}_2);$$

et

$$\mathrm{M}_2 \text{ par } \mathrm{P}r_2(\mathrm{L}_2-\lambda);$$

il vient

$$(c)\ \int_{\lambda}^{L_1} p\,dl = Q + (P-Q)\frac{r(L-L_1)[(r-r_2)(L-L_1)+(r_1-r_2)(L_1-L_2)]}{[r(L-L_1)+r_1(L_1-L_2)+r_2(L_2-\lambda)]^2}$$

Faisons dans cette formule $\lambda = L_2$, il vient

$$\int_{L_2}^{L_2} p\,dl = Q + (P-Q)\frac{r(L-L_1)[(r-r_2)(L-L_1)+(r_1-r_2)(L_1-L_2)]}{[r(L-L_1)+r_1(L_1-L_2)]^2}$$

Retranchons de cette expression, la résultante des pressions qui ont lieu, entre la première et la deuxième feuilles, dans l'intervalle $L_1 L_2$, c'est-à-dire le résultat qu'on obtient en faisant dans (a_1), $\lambda = L_2$; nous aurons par là la pression qui s'exerce entre la première et la deuxième feuilles, au point même qui correspond à l'extrémité de la troisième feuille. On a ainsi pour cette pression :

$$(P-Q)\frac{r(r_1-r_2)(L-L_1)(L-L_2)}{[r(L-L_1)+r_1(L_1-L_2)]^2}.$$

Supposons que les feuilles aient des épaisseurs décroissantes, alors $r_1 > r_2$ et l'on voit que, tant que $Q < P$, il y aura une presssion réelle et positive entre les deux feuilles en ce point. Si $Q > P$, l'inverse a lieu et en ce point les feuilles auront de la tendance à se séparer.

Si les feuilles ont des épaisseurs croissantes, l'inverse a lieu.

En différentiant une seconde fois la formule (c) écrite un peu plus haut, on a :

$$\varpi = 2(P-Q)\frac{rr_2(L-L_1)[(r_2-r)(L-L_1)+(r_2-r_1)(L_1-L_2)]}{[r(L-L_1)+r_1(L_1-L_2)+r_2(L_2-\lambda)]^3}.$$

On retrouve encore ici les même résultats. On voit que, si les feuilles ont des épaisseurs décroissantes, ϖ est négatif, tant que $Q < P$ et positif, quand $Q > P$,

de sorte que, dans ce cas, le ressort tend à bâiller, dans l'intervalle L_2L_3, entre la première et la deuxième feuilles, tant que le ressort n'est pas aplati et qu'au delà de l'aplatissement, le contact devient intime. Au contraire, quand les feuilles ont des épaisseurs croissantes, le contact est intime avant l'aplatissement et c'est au delà que le ressort tend à bâiller.

On pourrait continuer et examiner ce qui se passe dans un point quelconque du ressort, entre deux feuilles quelconques, et l'on arriverait toujours au même résultat, à savoir que, quand les feuilles ont des épaisseurs décroissantes, ils tendent, avant l'aplatissement, à bâiller, mais pas après; qu'au contraire, quand les feuilles ont des épaisseurs croissantes, c'est après l'aplatissement qu'ils tendent à bâiller, mais pas avant. Dans les deux cas, les feuilles joindront complétement sous la charge répondant à l'aplatissement. Il ne faut pourtant pas perdre de vue que ces effets seront un peu contrariés par les efforts mutuels des feuilles dans les sections répondant aux extrémités des étages, efforts qui sont en sens inverse de ceux qui ont lieu dans leur intervalle; mais ces derniers sont en général assez faibles, car ils sont proportionnels à des termes qui dépendent des différences seulement des rayons et à la différence entre la charge réelle et celle qui correspond à l'aplatissement, différence qui doit être en général, très-faible, quand le ressort travaille aplati sous la charge normale.

C'est aux causes précédentes qu'on doit attribuer ce fait bien connu que les ressorts construits avec une forte bande se conduisent mal et perdent beaucoup de leur flèche de fabrication sous les essais. Cela tient: 1° à ce qu'ils travaillent habituellement bien au-dessus de l'aplatissement; 2° à ce que les épaisseurs ne sont

pas calculées par les formules $e = 2r\alpha$, $e_1 = 2r_1\alpha_1$, etc. Mais il n'est pas douteux qu'ils se comporteraient fort bien, si les épaisseurs étaient calculées d'après cette loi et si, de plus, ils étaient calculés pour être sensiblement horizontaux sous la charge normale.

On voit ainsi, en outre, qu'il convient de faire en sorte qu'un ressort travaille habituellement aplati sous la charge qu'il supporte; indépendamment de ce que alors les glissements des feuilles, et par suite le travail dû au frottement sont moindres, et j'ai indiqué un peu plus haut comment on calculerait, dans tous les cas, un ressort de cette espèce, que les épaisseurs des feuilles soient les mêmes ou différentes les unes des autres.

Je passe maintenant à la description d'un autre type de ressort.

Ressort à auxiliaire.

Le même raisonnement qui a servi à établir que les ressorts à feuilles d'épaisseurs égales ou sensiblement égales avaient, toutes choses égales d'ailleurs, un volume moindre que les ressorts ayant, avec la même maîtresse feuille, même flexibilité et même résistance, mais dont les feuilles ou certaines d'entre elles auraient des épaisseurs décroissantes à partir du haut, fait voir que le volume diminue encore, quand les épaisseurs croissent du haut vers le bas, car les étagements augmentent alors rapidement et le profil extérieur du ressort aplati rentre encore plus en dedans de la ligne ABK (*fig.* 4). La différence des volumes est encore plus sensible si la maîtresse feuille est déjà elle-même plus épaisse que dans le ressort équivalent comme flexibilité et résistance propre, mais dont les feuilles seraient toutes de même épaisseur.

Le ressort que je vais décrire réalise complétement ces conditions, comme on va le reconnaître. Tout en ayant la flexibilité et la résistance propre demandées,

son volume et par suite son poids sont donc notablement moindres que ceux d'un ressort ayant même flexibilité et même résistance, mais dont les feuilles auraient toutes la même épaisseur.

En principe, on a fait remplir par des appareils différents deux conditions essentiellement distinctes: la flexibilité et la résistance qui n'ont nullement besoin d'être remplies par le même instrument. Le ressort se compose alors des deux parties : l'une, formée de feuilles toutes de même épaisseur, constitue le ressort proprement dit; elle travaille seule ordinairement sous la charge normale; l'autre, placée au-dessous, est plus épaisse et divergente, et ne vient en contact avec elle que sous un excès de charge et successivement. Cette dernière partie qui sert d'auxiliaire est calculée d'après l'excès de résistance propre qu'on désire attribuer au ressort, quelle que soit d'ailleurs cette résistance.

Subsidiairement on peut remarquer qu'un pareil ressort, tout en conservant au système la flexibilité voulue, au départ, doit amortir plus vite les oscillations et cela progressivement, car l'auxiliaire est calculé de manière à établir un contact graduel entre lui et le ressort proprement dit.

Dans la pratique, voici comment on déterminera un ressort de cette espèce.

On commencera par fixer la flèche maxima et la flèche minima de fabrication que puisse avoir le ressort.

La première répondra au ressort complétement formé de feuilles d'épaisseurs égales et calculé par la méthode précédemment exposée, l'aplatissement ayant lieu sous une charge quelconque, mais fixée d'avance, 2P, au moins égale à la charge normale et au plus égale à celle qui répond à la limite d'élasticité, par exemple à $0^{m},005$. Cette charge 2P est celle sous laquelle aura également

$$2rf' = f'^2 + c^2$$

ou

$$2rf'' = (f'' - i)^2 + c^2,$$

suivant que la corde $2c$ est donnée en fabrication ou sous charge. On a, dans le premier cas :

$$f' = r - \sqrt{r^2 - c^2}$$

et dans le second

$$f'' = r + i - \sqrt{r^2 + 2ri - c^2}.$$

On a ensuite

$$L = \sqrt{2rf''};$$

puis l'étagement

$$l = \frac{M}{Pr}i,$$

ce qui détermine les autres longueurs L_1, L_2, etc.

On peut aussi calculer immédiatement, sans passer des approximations successives, le moment d'élasticité M. En effet, il est facile de reconnaître que

$$l^3 = \frac{2Ea\alpha^3}{3P^3}M^3.$$

Remplaçant l^3 par cette valeur dans la formule (VII), on est conduit, pour la détermination de M, à la résolution de l'équation suivante du second degré :

$$M^2 - \frac{9niP^3}{Ea\alpha^3n^3Q}M + \frac{3QP^3L^3}{Ea\alpha^3n^3Q} = 0.$$

Celle-ci peut être elle-même ramenée à une forme très-simple. En effet, appelons m le moment d'élasticité du ressort complet à feuilles de même épaisseur ; l_1, r_1 l'étagement et le rayon correspondant et N le nombre des feuilles de celui-ci.

Remplaçant i par sa valeur $\frac{QL^3}{2Nm}$; puis $E\alpha\alpha^3$ par sa valeur $\frac{3m}{2r_1^3}$ et Pr_1 par $\frac{m}{l_1}$ ou, ce qui revient sensiblement au même, par $\frac{Nm}{L}$, il vient :

$$\frac{9niP^2}{E\alpha\alpha^3 n^3 Q} = 3\frac{N^2}{n^2}m \quad \text{et} \quad \frac{3QP^3L^3}{E\alpha\alpha^3 n^3 Q} = 2\frac{N^3}{n^3}m^2.$$

L'équation du second degré devient alors

$$(\delta) \qquad \left(\frac{M}{m}\right)^2 - 3\frac{N^2}{n^2}\left(\frac{M}{m}\right) + 2\frac{N^3}{n^3} = 0.$$

Cette équation très-simple donne

$$\frac{M}{m} = \frac{3}{2}\frac{N^2}{n^2}\left(1 \pm \sqrt{1 - \frac{8n}{9N}}\right).$$

Ces deux valeurs sont toujours réelles, puisque n ne peut surpasser N. Mais une seule des deux conviendra. En effet, il faut que nl ne surpasse pas L ou qu'on ait :

$$n^3 l^3 \leqq L^3.$$

Remplaçant, comme précédemment l^3 par $\frac{2E\alpha\alpha^3}{3P^3}M^2$; puis $E\alpha\alpha^3$ par $\frac{3m}{2r_1^3}$ et enfin $P^3r_1^3$ par $\frac{N^3m^3}{L^3}$, on a, réductions faites :

$$\frac{M^2}{m^2} \leqq \frac{N^3}{n^3}.$$

Or prenons d'abord

$$\frac{M}{m} = \frac{3}{2}\frac{N^2}{n^2}\left(1 + \sqrt{1 - \frac{8n}{9N}}\right).$$

En substituant dans l'inégalité ci-dessus, on arrive à

$$\sqrt{1 - \frac{8n}{9N}} + 1 - \frac{2n}{3N} \leqq 0,$$

ce qui n'est pas, puisque le seul terme négatif $\frac{2n}{3N}$ est plus petit que 1.

Prenons maintenant

$$\frac{M}{m}=\frac{3N^2}{2n^2}\left(1-\sqrt{1-\frac{8n}{9N}}\right).$$

On obtient, en substituant,

$$\sqrt{1-\frac{8n}{9N}} \geqq 1-\frac{2n}{3N}.$$

En élevant au quarré et réduisant, on trouve

$$\frac{n}{N} \leqq 1,$$

condition toujours satisfaite.

Ainsi la vraie valeur de $\frac{M}{m}$ est

$$\frac{M}{m}=\frac{3N^2}{2n^2}\left(1-\sqrt{1-\frac{8n}{9N}}\right).$$

Connaissant $\frac{M}{m}$, et, par suite, M, on a l'épaisseur e, le rayon r, la flèche de fabrication, la longueur développée de la maîtresse feuille et l'étagement, exactement comme dans l'autre méthode, où M s'obtient par un petit nombre d'approximations successives.

On a ainsi calculé tous les éléments du ressort composé de $k+1$ feuilles, c'est-à-dire du plus petit nombre possible de feuilles d'égale épaisseur. Toutefois, comme ce ressort doit suffire à lui tout seul, jusqu'à la limite de charge égale à 2Q, il reste encore une condition dont il faut s'assurer, c'est que sous cette charge l'allongement λ n'est pas atteint. Il suffit pour cela de vérifier qu'au centre du ressort, où se produisent les plus forts

allongements, le ressort n'est pas encore aplati sous la charge 2Q, et comme en ce point la valeur inverse du rayon de courbure est

$$\frac{(k+1)\frac{M}{r} - QL}{(k+1)M},$$

on voit qu'il suffit de s'assurer si l'on a

$$(k+1)\frac{M}{r} > QL.$$

Si cette condition est remplie, le ressort ne sera encore aplati dans aucun de ses points et pourra être adopté. Si elle n'est pas satisfaite, cela indiquera que le ressort doit être formé d'un plus grand nombre de feuilles, et on opérera comme il sera indiqué un peu plus loin.

Il reste maintenant à déterminer l'auxiliaire, c'est-à-dire la partie destinée à n'agir qu'éventuellement, et à porter à la limite 2P le degré de résistance propre du ressort.

Si l'on donne à l'auxiliaire la forme circulaire, son rayon de fabrication n'est pas douteux et doit être égal au rayon même qui a lieu au milieu du ressort proprement dit, sous la charge 2Q. En appelant R' ce rayon, on a vu que

$$\frac{1}{R'} = \frac{(k+1)\frac{M}{r} - QL}{(k+1)M};$$

donc

$$R' = \frac{(k+1)M}{(k+1)\frac{M}{r} - QL}.$$

La demi-longueur L' de l'auxiliaire est connue d'avance, car elle est égale à la moitié de la dernière

feuille du ressort, diminuée de l'étagement $\frac{M}{Pr}$. Cet auxiliaire peut presque toujours d'ailleurs être formé d'une seule feuille. Il suffit pour cela que son moment d'élasticité M' soit déterminé par la relation $M' = PR'L'$, car on aurait, pour la longueur de l'étagement qui lui correspond, $\frac{M'}{PR'}$; de sorte que le ressort s'aplatira complétement sous la charge 2P.

Il faut toutefois s'assurer que l'épaisseur e', qui résulte de cette valeur de M', n'est pas plus grande que celle tirée de la formule $e' = 2R'\alpha$, et qu'il ne convient pas alors de prendre, parce qu'elle ne ferait qu'introduire de la matière sans utilité, et qu'elle s'opposerait même à ce que le centre du ressort s'aplatît sous la charge 2P. Je le répète, c'est ce qui arrivera presque toujours, parce que le rayon R' étant généralement très-grand, il en serait de même de l'épaisseur $2R'\alpha$. Si cependant le contraire arrivait, on prendrait l'épaisseur égale à $2R'\alpha$; l'auxiliaire se composerait alors de plusieurs lames d'égale épaisseur, et dont l'étagement serait $\frac{M'}{PR'}$, M' étant calculé ici d'après l'épaisseur $2R'\alpha$; mais presque toujours une seule lame suffira.

Dans le cas très-général où une seule lame suffit, on pourrait à volonté en augmenter le nombre, en diminuant leur épaisseur, mais leur conservant toujours le même rayon de fabrication; mais alors on augmenterait inutilement le volume de l'auxiliaire. La démonstration est exactement semblable à celle qui a servi à établir qu'un ressort, à feuilles d'égale épaisseur, avait un volume plus petit que tout autre de même flexibilité et de même résistance, mais dont les feuilles auraient, ou au moins quelques-unes d'entre elles, des épais-

seurs décroissantes, du haut vers le bas du ressort. Ainsi, l'auxiliaire étant supposé aplati, plus le nombre des feuilles qui le composent sera grand, et plus la ligne FHKO (*fig.* 10), qui passe par les extrémités de chacune d'elles, ira rencontrer la ligne AO en un point éloigné du point A, car l'étagement

$$l = \frac{M'}{PR'} = \frac{Ea}{12PR'} e'^3;$$

d'où

$$\frac{l}{e'} = \frac{Ea}{12PR'} e'^2 \quad \text{et} \quad \frac{l}{e'}$$

est d'autant plus petit que e' l'est lui-même davantage. Donc le triangle AUO aura une surface d'autant plus grande que le nombre des feuilles sera plus grand, puisque la base AU a toujours la même longueur. D'un autre côté, la somme des triangles UBF, FSH, HTK, etc., a une surface égale à la moitié du produit de AU par l'épaisseur des lames; par conséquent cette somme est d'autant plus petite que cette épaisseur l'est elle-même davantage. Or la section du ressort a une surface égale à la différence entre le triangle AUO et l'ensemble des petits triangles dont il vient d'être question. Cette section et, par suite, le volume du ressort sont donc d'autant plus grands que l'épaisseur des lames est plus petite.

Il résulte de là qu'on doit, sous ce rapport, chercher à former l'auxiliaire du plus petit nombre de feuilles possible; et, comme on le verra tout à l'heure, presque toujours une lame suffira. Cependant on peut à volonté augmenter, comme on vient de le voir, le nombre des feuilles de l'auxiliaire, en réduisant leur épaisseur; ce qui offre l'avantage de diminuer l'allongement éprouvé par le milieu du ressort.

On peut d'ailleurs profiter de la bride qui assemble les feuilles par leur milieu pour réduire encore les dimensions de l'auxiliaire. Ainsi, si $2d$ est la longueur de la bride parallèlement au sens longitudinal des feuilles, il suffit, pour que la charge $2P$ aplatisse totalement le ressort sans l'infléchir en sens inverse en aucun de ses points, de faire M' égal, non pas à $PR'L'$, mais à $PR'(L'-d)$; car alors, sous la charge $2P$, le ressort sera aplati à son entrée dans la bride, et celle-ci l'empêchera de dépasser l'aplatissement dans la partie qu'elle embrasse.

Il est souvent possible de diminuer encore d'une manière très-notable l'épaisseur de l'auxiliaire de la manière suivante. Il suffit pour cela de diminuer son rayon, l'épaisseur s'ensuivant toujours d'après la relation $M'=PR'L'$, ou plutôt $M'=PR'(L'-d)$, d étant la moitié de la bride. Il arrive alors seulement que le contact du ressort proprement dit avec l'auxiliaire commence un peu plus tôt que sous la charge normale; mais la différence est tout à fait négligeable quand le rayon R' est très-grand, ce dont on s'assure facilement d'avance. On se trouve ainsi conduit à la règle suivante pour le calcul des auxiliaires.

On doit d'abord, s'étant donné la plus petite charge sous laquelle on puisse faire commencer le contact du ressort proprement dit avec l'auxiliaire, chercher le rayon correspondant, lequel sera le plus petit rayon qu'on puisse donner à l'auxiliaire. On aura alors, par la formule $M'=PR'(L'-d)$, la plus petite épaisseur possible pour l'auxiliaire. On vérifiera ensuite que l'allongement du centre de l'auxiliaire, lorsqu'il est aplati, n'est pas trop fort.

Il est bien entendu qu'il convient toujours que chaque feuille de ressort, ainsi que l'auxiliaire, soient

amincis dans l'intervalle qui correspond à leur étagement. Cet amincissement se fera toujours suivant la règle qui a été posée une fois pour toutes.

Il est facile d'évaluer la diminution de volume qui résulte de ces amincissements. Ainsi, soit ABC (*fig.* 11) la section de l'amincissement qui a lieu à l'extrémité d'une lame, soient AB $= l$ l'étagement, BC $= e$ l'épaisseur de la lame non amincie, DE $= y$ l'épaisseur réduite en un point quelconque et AD $= x$, on a :

$$\frac{y^3}{e^3} = \frac{x}{l} \quad \text{ou} \quad y^3 = \frac{e^3}{l}x;$$

mais la surface ABC $= \int_0^l y\,dx$. Remplaçant y par sa valeur en x, et intégrant, on trouve :

$$\text{Surface ABC} = \frac{3}{4}el.$$

Ainsi la surface ABC est les trois quarts du rectangle qui serait formé sur les côtés AB et BC, d'où résulte qu'à l'aide des amincissements on réduit le volume des feuilles du quart de la partie où ont lieu ces amincissements, et qui répond aux étagements.

On saura donc calculer très-exactement le volume d'un ressort, en tenant compte des amincissements.

J'ai indiqué la manière de déterminer le ressort de $k+1$ feuilles, c'est-à-direcomposé du plus petit nombre de lames possible. J'ai observé que ce ressort lui-même ne conviendrait pas si le centre du ressort était plus qu'aplati sous la charge 2Q. Il faut alors chercher à le composer d'un plus grand nombre de feuilles, et il convient même, dans tous les cas, de faire cette recherche, afin de trouver quel est le ressort le plus convenable parmi ceux ayant $k+1$, $k+2$, $k+3$, etc., feuilles, jusqu'à celui composé de plus grand nombre de feuilles, et qui n'aurait

pas d'auxiliaire. On comprend, en effet, qu'à mesure que le nombre des feuilles augmente, le volume du ressort proprement dit va généralement en augmentant, tandis que celui de l'auxiliaire diminue, puisque son rayon de fabrication, son moment d'élasticité et sa longueur ne peuvent que diminuer. Il est donc nécessaire de déterminer le ressort successivement avec $k+1$, $k+2$, $k+3$, etc., feuilles, afin de choisir celui dont le prix sera le moindre. De plus, il est une autre considération qui doit servir à guider dans le choix de ces différents ressorts, c'est l'allongement qu'éprouve le milieu du ressort sous la charge normale, lequel est plus grand que dans le ressort à feuilles de même épaisseur, ou, ce qui revient au même, plus grand que dans la partie étagée du ressort avec auxiliaire lui-même. Plus le nombre des feuilles du ressort proprement dit sera grand, et plus cet allongement du centre du ressort sera faible, tout en étant supérieur à l'allongement du ressort à feuilles de même épaisseur. Il est très-admissible, en effet, que le centre du ressort éprouve un allongement plus fort sous la charge normale, parce que la présence de l'auxiliaire s'oppose fortement aux accroissements de cet allongement sous l'influence des oscillations, de la surcharge, d'une inégale répartition de la charge, etc., causes qui agissent directement sur le reste du ressort qui n'est pas en contact avec l'auxiliaire. On fera donc intervenir l'allongement du centre du ressort sous la charge normale, dans le choix entre les différents ressorts avec auxiliaire. Voici, du reste, comment l'on procédera.

On peut d'abord faire usage de la méthode directe par l'emploi de l'équation (δ), pour la détermination du ressort ayant $k+1$ feuilles, de celui qui en a $k+2$, de celui qui en a $k+3$, etc. On peut aussi employer la

méthode des approximations successives. A cet effet, ayant obtenu le ressort de $k+1$ feuilles, pour déterminer celui de $k+2$ feuilles, on commencera par ajouter à celui de $k+1$ feuilles une feuille de même épaisseur. On aura la flexion correspondante, qui sera nécessairement moindre que i, par la formule (VII). On aura donc un ressort de $k+2$ feuilles, mais trop roide et donnant une flexion inférieure à i. Il suffira donc, d'après ce qu'on a vu, de réduire le moment d'élasticité des feuilles dans le rapport de cette flexion à i, et l'on aura l'épaisseur des feuilles du ressort cherché. On vérifiera la flexion, et presque toujours l'approximation sera déjà suffisante. Si l'on ne la jugeait pas assez grande, il suffirait de changer encore une fois le moment d'élasticité dans le rapport des flexions. Ayant le moment d'élasticité des feuilles, on a leur épaisseur, leur rayon, la flèche de fabrication, l'étagement et la longueur de ces feuilles, absolument comme pour le ressort de $k+1$ feuilles. On détermine aussi l'auxiliaire exactement de même, après s'être assuré que le ressort proprement dit n'est pas plus qu'aplati sous la charge 2Q.

Au moyen du ressort de $k+2$ feuilles, on déterminera celui de $k+3$ feuilles; au moyen de celui-ci, celui qui en a $k+4$, et ainsi de suite. On finit par arriver de cette manière au ressort qui n'a pas d'auxiliaire et qu'on peut calculer directement. Dans le tableau des ressorts ainsi déterminés, on choisit celui qui paraît le plus satisfaisant sous le rapport du volume, du prix, de l'allongement du milieu du ressort, sous la charge normale, etc., et c'est celui-ci qu'il convient d'adopter.

Il est une précaution à prendre quand les éléments de la question sont tels que la maîtresse feuille corres-

ponde, en fabrication, à un angle au centre, relativement très-grand, ce qui arrive, par exemple, en général, quand la flexibilité du ressort doit être très-grande. Dans ce cas, le calcul du ressort avec axiliaire exige une certaine précaution, et, si l'on employait immédiatement la formule de la flexion, on obtiendrait un ressort qui ne serait pas suffisamment exact. et dans lequel la flexibilité pourrait différer de celle demandée d'une quantité qui pourrait aller, dans des cas extrêmes, jusqu'à 15 à 20 p. 100. C'est ce que je vais faire comprendre.

Toutes les formules donnant, soit les rayons de courbure sous charge, ou la flexion supposent une condition qui a lieu généralement, à savoir que la demi-longueur de la maîtresse feuille, estimée suivant sa courbe, peut être assimilée à une ligne droite perpendiculaire à la charge, car dans l'établissement des équations fondamentales les différentes parties qui composent cet arc sont regardées comme les bras de levier de la charge. Lorsque cette condition est remplie, tout s'ensuit et devient rigoureux; c'est ce qui a lieu, en effet, excepté quelquefois pour des ressorts très-flexibles.

Dans tous les cas, on peut la regarder comme satisfaite pour tout ce qui se rattache au ressort sous charge, car alors le ressort n'est relativement que peu cintré. Ainsi les rayons de courbure sous charge, calculés par les formules ordinaires, sont exacts; il en est de même de l'épure qu'ils servent à construire.

Quant à la formule de la flexion, c'est différent: cette formule résulte de la différence de deux autres, dont l'une est la flèche sous charge, et l'autre la flèche sans charge: la formule qui donne la flèche sous charge est exacte; quant à celle qui donne la flèche sans charge,

elle cesse d'être suffisamment exacte quand le ressort en fabrication et sans charge est très-cintré. En effet, reprenons la formule (I) qui donne la flèche d'un ressort avec ou sans charge, et faisons-y les substitutions convenables, c'est-à-dire $r = r_1 = r_2 =$ etc., et $\lambda = L$. Alors la formule donnera exactement la flèche d'un ressort sous une charge suffisante pour que le ressort ne conserve plus que peu de cintre. Si l'on fait en outre dans la même formule $Q = 0$, elle donnera, pour la flèche sans charge, $y = \frac{L^2}{2r}$. Or, si N est la corde qui sous-tend en fabrication l'arc L, il est évident que la véritable valeur de la flèche sans charge, ou de fabrication, est $\frac{N^2}{2r}$ et non pas $\frac{L^2}{2r}$; de sorte que l'on a, par la formule, une flèche de fabrication trop grande de

$$\frac{L^2}{2r} - \frac{N^2}{2r} = \frac{1}{2r}(L^2 - N^2),$$

et, par suite, que la flexion donnée par la formule (II) et par celles qui en dérivent, est elle-même trop grande de la même quantité; en sorte que la véritable flexion n'est pas la formule (II), mais cette même formule diminuée de $\frac{1}{2r}(L^2 - N^2)$. Toutefois, je le répète, ce n'est que rarement qu'il y a à tenir compte de cette circonstance, et il suffit pour s'en assurer de chercher, dans les différents cas, la valeur de $\frac{1}{2r}(L^2 - N^2)$.

Reste à voir comment se fera le calcul exact du ressort quand cette circonstance n'est pas négligeable. Pour fixer les idées, je vais prendre des nombres. Supposons qu'on veuille obtenir, sous une certaine charge, une flexion de $0^m,300$, et que, pour un cer-

tain nombre de feuilles qu'on essaye à la formule, on ait

$\frac{1}{2r}(L^2 - N^2) = 0^m,041.$

Dans ce cas, il faudra que la formule donne, non pas $0^m,300$, mais $0^m,341$; c'est-à-dire qu'on procédera par la méthode ordinaire, par des approximations successives, mais en visant à obtenir non pas $0^m,300$, mais $0^m,341$; à mesure que les moments d'élasticité se modifieront dans le rapport des flexions, la différence $\frac{1}{2r}(L^2 - N^2)$ variera, mais il est facile de voir qu'elle ne variera que très-peu; du reste, on pourra chaque fois prendre la nouvelle valeur et la substituer.

Relativement aux ressorts sans auxiliaires, pour tenir compte de la circonstance ci-dessus mentionnée, il suffit de ne pas se servir de la formule $L^2 = 2rf$, et de la remplacer par $N^2 = 2rf$. La longueur de l'arc L résulte ensuite de son tracé. Du reste, dans tous les cas, la véritable longueur de l'arc peut s'obtenir, autrement que par son tracé, par des formules trigonométriques très-simples. Ainsi, dans le cas actuel, on aurait :

$$L = r \text{ arc sin verse } \frac{f}{r}$$

ou

$$L = r \text{ arc cos } \frac{r - f}{r},$$

formules facilement calculables par logarithmes.

Telle est la méthode pour calculer les ressorts de cette espèce, composés de deux parties essentiellement distinctes et appelées à jouer des rôles différents. L'auxiliaire étant destiné à donner de la résistance, mais ne devant lui-même fléchir que très-peu, on comprend qu'il pourra souvent arriver que la limite des allongements qu'il est appelé à subir soit assez faible pour per-

mettre de le former de fer, ou même de bois, au lieu d'acier.

Aussi, pour chaque calcul d'auxiliaire, il faut successivement tenter le calcul avec l'acier, le fer et le bois. Dans ce dernier cas, les épaisseurs de l'auxiliaire se déduisent de celles des auxiliaires en fer ou en acier d'une manière fort simple. Par exemple, R' étant le plus petit rayon qu'on puisse donner à l'auxiliaire, on a toujours $M' = PR'(L' - d)$; or, pour du bon bois, $E' = 1.300.000.000$ environ, et si E est le moment d'élasticité pour le fer ou l'acier, on a $E = 20.000.000.000$. Mais

$$\sqrt[3]{\frac{E}{E'}} = \sqrt[3]{\frac{20.000.000.000}{1.300.000.000}} = 2,5$$

à très-peu près, et comme M' est indépendant de la matière, et que, par suite, les épaisseurs devront varier en raison inverse des racines cubiques des coefficients d'élasticité, il s'ensuit que, pour le même rayon donné à l'auxiliaire, l'épaisseur en bois doit être deux fois et demie celle de l'auxiliaire en acier ou en fer. Il est bien entendu que R' représente toujours, sinon le rayon sous la charge normale, du centre du ressort proprement dit, du moins le rayon correspondant à la plus petite charge sous laquelle on veuille faire commencer le contact du ressort proprement dit avec l'auxiliaire.

Plusieurs ressorts ont été construits avec des auxiliaires en fer ou en bois ainsi calculés, et ils se sont parfaitement comportés.

Enfin, il y a encore un moyen de diminuer le volume de l'auxiliaire, et, par suite, le poids du ressort, dans le cas presque universel où l'auxiliaire peut être formé d'une seule feuille. Voici comment :

Au lieu de donner à cette feuille la forme circulaire, supposons qu'on lui ait donné en fabrication la forme affectée par la dernière lame du ressort, lorsque celui-ci supporte la charge 2Q, ou plutôt une forme un peu plus infléchie que celle-ci, afin que dans ses oscillations le ressort proprement dit vienne s'appliquer progressivement et non brusquement sur l'auxiliaire; que d'ailleurs la longueur de l'auxiliaire soit toujours celle de la dernière feuille, en en retranchant de part et d'autre l'étagement; cette forme du ressort sous charge est facile à obtenir par une épure, comme cela a été exposé dans le commencement. Il est évident que le rayon de courbure de l'auxiliaire ira en diminuant depuis le centre jusqu'aux extrémités. D'après cela, en appelant m', r' et l', pour une section quelconque de l'auxiliaire, son moment d'élasticité, son rayon de fabrication et sa distance à l'extrémité de l'auxiliaire la plus rapprochée, on a $m' = Pr'l'$, car il faut que le ressort s'aplatisse complétement sous la charge 2P. On voit par là que le moment d'élasticité, et, par suite, l'épaisseur est plus petite que si l'on avait donné à l'auxiliaire la forme circulaire, car alors R' étant son rayon de fabrication, qui serait égal à celui du milieu du ressort sous la charge 2Q, on aurait :

$$m' = Pr'l' \quad \text{et} \quad R' > r'.$$

En opérant ainsi, on diminuera donc très-sensiblement le volume de l'auxiliaire, et, par suite, le poids du ressort.

On peut d'ailleurs évaluer le volume qui résulte, pour le ressort, de cette construction. Il suffit pour cela d'obtenir la surface S de la section terminée par le profil extérieur de l'auxiliaire. Voici comment on aura cette surface.

Je suppose que le ressort proprement dit se compose de n feuilles; en conservant les notations employées jusqu'à présent, on a, pour une section de l'auxiliaire :

$$m' = Pr'(L' - \lambda),$$

L' désignant la demi-longueur de l'auxiliaire. Or

$$y^3 = e'^3 \frac{m'}{M'};$$

e' et M' représentent l'épaisseur et le moment d'élasticité au milieu de l'auxiliaire ; de plus

$$\frac{1}{r'} = \frac{\frac{nM}{r} - QL + Q\lambda}{nM}.$$

Donc

$$y^3 = e'^3 \frac{nMP}{M'} \times \frac{L' - \lambda}{\frac{nM}{r} - QL + Q\lambda}.$$

On tire de là

$$\lambda = \frac{e'^3 \frac{nMP}{M'} L' - \left(\frac{nM}{r} - QL\right) y^3}{Qy^3 + e'^3 \frac{nMP}{M'}}$$

ou, en divisant le numérateur par le dénominateur,

$$\lambda = \frac{QL - \frac{nM}{r}}{Q} + \frac{\frac{e'^3 nMP}{M'Q}\left(\frac{\frac{nM}{r} - QL + QL'}{Q}\right)}{y^3 + \frac{e'^3 nMP}{M'Q}}$$

Or, $S = \int_0^{e'} \lambda dy$. Donc, si l'on fait pour abréger,

$$\frac{e'^3 nMP}{M'Q} = u^3,$$

on a

$$S = \left(L - \frac{nM}{Qr}\right)e' + u^3\left(\frac{nM}{Qr} - L + L'\right)\int_0^{e'} \frac{dy}{y^3 + u^3},$$

Mais

$$\int_0^{e'} \frac{dy}{y^3 + u^3}$$

s'obtient par la méthode ordinaire d'intégration des fractions rationnelles et l'on trouve

$$\int_0^{e'} \frac{dy}{y^3+u^3} = \frac{1}{6u^2} \log \text{hyp.} \left[\frac{(e'+u)^2}{e'^2 - ue' + u^2}\right] +$$

$$+ \frac{\sqrt{3}}{3u^2}\left[\text{arc tang.}\left(\frac{2e' - u}{u\sqrt{3}}\right) - \text{arc tang.}\left(-\frac{1}{\sqrt{3}}\right)\right].$$

On peut remplacer — arc tang. $\left(-\frac{1}{\sqrt{3}}\right)$ par arc tang. $\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)$, et si l'on prend pour cet arc le plus petit des arcs positifs dont la tangente est $\frac{1}{\sqrt{3}}$, lequel arc n'est autre chose que celui de 30°, c'est-à-dire $\frac{\pi}{6}$; l'arc dont la tangente est $\frac{2e' - u}{u\sqrt{3}}$ sera toujours compris entre la valeur négative de cet arc ou $\frac{\pi}{6}$ et $\frac{\pi}{2}$. Il n'y aura donc aucune incertitude dans le choix des arcs. On peut aussi remplacer les logarithmes hyperboliques par les logarithmes décimaux, en multipliant ces derniers par le module, qui est 2,3026.

En désignant donc par log. les logarithmes décimaux, on a définitivement

$$S = \left(L - \frac{nM}{Qr}\right)e' +$$

$$\frac{2,3026u}{6}\left(\frac{nM}{Qr} - L + L'\right)\log\left[\frac{(e'+u)^2}{e'^2 - ue' + u^2}\right] +$$

$$+ \frac{u\sqrt{3}}{3}\left(\frac{nM}{Qr} - L + L'\right)\left[\text{arc tang.}\left(\frac{2e'-u}{u\sqrt{3}}\right) + \frac{\pi}{6}\right],$$

où l'on sait d'ailleurs que

$$u = e'\sqrt[3]{\frac{nMP}{M'Q}}.$$

J'ai observé que, pour qu'on puisse donner à l'auxiliaire la forme qui vient d'être spécifiée, il fallait que l'épaisseur au centre, calculée par la formule $M' = PR'L'$, fût tout au plus égale à $2R'\alpha$. Si cette condition était remplie, mais si, pour les autres sections de l'auxiliaire, l'épaisseur calculée par la formule $m' = Pr'l'$ finissait quelque part par surpasser $2r'\alpha$, il faudrait cesser de faire varier les rayons r' là où ce fait commencerait à se manifester, et ne plus faire varier les rayons jusqu'aux extrémités de l'auxiliaire ; mais on continuerait néanmoins à amincir la feuille d'après la règle $m' = Pr'l'$, où r' aurait une valeur constante.

En résumé, quand on veut donner à l'auxiliaire cette forme, au lieu de la forme circulaire, le calcul de l'auxiliaire peut présenter trois cas :

1° L'épaisseur, calculée d'après la formule $m' = Pr'l'$, peut être, dans toute l'étendue de l'auxiliaire, inférieure à $2r'\alpha$, r' désignant le rayon variable du point correspondant du ressort sous la charge 2Q. Dans ce cas, on peut donner à l'auxiliaire en fabrication la forme du ressort sous la charge 2Q, ou plutôt, comme cela a déjà été dit, il faut lui donner une forme un peu plus infléchie, afin que le contact de l'auxiliaire avec

le ressort proprement dit ne s'établisse que graduellement. Les amincissements se feront d'après la formule $m' = Pr'l'$.

2° L'épaisseur, calculée d'après la formule $m' = Pr'l'$, tout en étant inférieure à $2r'\alpha$ au centre de l'auxiliaire, peut finir par surpasser $2r'\alpha$ en approchant des extrémités.

Alors, après avoir fait varier les rayons en partant du centre, on les laissera constants à partir du point où l'épaisseur déduite de la formule $m' = Pr'l'$ est devenue égale à $2r'\alpha$. Quant aux amincissements, ils seront toujours formés d'après la relation $m' = Pr'l'$.

3° L'épaisseur, calculée d'après la formule $m' = Pr'l'$, peut déjà surpasser $2r'\alpha$ au centre de l'auxiliaire. Dans ce cas, celui-ci se composera nécessairement de plusieurs feuilles d'une épaisseur commune égale à $2r'\alpha$, de forme circulaire, et dont les étagements seront tous égaux à $\frac{m'}{Pr'}$, où m' aurait la valeur répondant à l'épaisseur $2r'\alpha$. Les amincissements seront toujours donnés par la formule ordinaire.

De ces trois cas, celui qui arrivera presque toujours est le premier. Voici comment on peut le prouver : de ce que $m' = Pr'l'$, il s'ensuit que le cube de l'épaisseur ou $e'^3 = \frac{12Pl'r'}{Ea}$.

Or comme cette épaisseur doit être moindre que $2r'\alpha$ pour que le premier cas ait lieu, il s'ensuit, en remplaçant l' par $L' - \lambda$,

$$\frac{12P(L'-\lambda)}{Ea} < 8\alpha^3 r'^2,$$

ou, comme

$$\frac{1}{r'} = \frac{\frac{nM}{r} - QL + Q\lambda}{nM}.$$

on doit avoir

$$\frac{12P(L'-\lambda)}{Ea} < 8\alpha^2 \times \frac{M^2n^2}{\left(\frac{nM}{r} - QL + Q\lambda\right)^2},$$

ou

$$(L'-\lambda)\left(\frac{nM}{r} - QL + Q\lambda\right)^2 < \frac{2\alpha^3n^2M^2Ea}{3P}.$$

Telle est la condition qui doit être remplie par toutes les valeurs de λ comprises entre o et L′, pour que le premier cas ait lieu. Or il est évident qu'elle le sera, si le maximum du premier membre est plus petit que le second. Cherchons donc le maximum du premier membre. En en prenant la dérivée première, on a

$$-\left(\frac{nM}{r} - QL + Q\lambda\right)^2 + 2(L'-\lambda)\left(\frac{nM}{r} - QL + Q\lambda\right)Q = 0.$$

Le facteur $\frac{nM}{r} - QL + Q\lambda$ peut être supprimé, car il ne saurait être nul, attendu qu'aucun rayon de courbure entre o et L ne devient infini sous la charge 2Q.

On a alors pour le maximum

$$\lambda = \frac{1}{3}\left(L + 2L' - \frac{nM}{Qr}\right),$$

ce qui donne pour la valeur du maximum

$$\frac{4}{27}Q^2\left(L' - L + \frac{nM}{Qr}\right)^3.$$

D'ailleurs on a $L - L' = \frac{nM}{Pr}$. La valeur du maximum est donc égale à

$$\frac{4}{27}Q^2\frac{n^3M^3}{r^3}\left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{P}\right)^3.$$

Il est d'ailleurs facile de vérifier que c'est bien un

maximum et non pas un minimum. En effet, si on prend la dérivée seconde de la fonction de λ, et qu'on y remplace λ par

$$\frac{1}{3}\left(L + 2L' - \frac{nM}{Qr}\right),$$

on a pour résultat

$$Q\left(L - L' - \frac{nM}{Qr}\right) = Q\frac{nM}{r}\left(\frac{1}{P} - \frac{1}{Q}\right),$$

c'est-à-dire une quantité négative. Ainsi le résultat obtenu plus haut est un maximum. Cela établi, je pose l'inégalité

$$\frac{4}{27}Q^2\frac{n^3M^3}{r^3}\left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{P}\right)^3 < \frac{2\alpha^3 n^2 M^2 E a}{3P};$$

or

$$Ea = \frac{12M}{e^3} = \frac{12M}{8\alpha^3 r^3} = \frac{3M}{2\alpha^3 r^3},$$

de sorte que $\frac{2\alpha^3 Ea}{3} = \frac{M}{r^3}$ et le second membre de l'inégalité ci-dessus devient $\frac{n^2M^3}{Pr^3}$.

Par suite l'inégalité elle-même devient, par la suppression des facteurs communs,

$$\frac{4}{27}Q^2 n\left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{P}\right)^3 < \frac{1}{P} \quad \text{ou} \quad n < \frac{27P^2Q}{4(P-Q)^3}.$$

Or cette condition sera presque toujours remplie. En effet, plus $\frac{P}{Q}$ est petit, plus le second membre est grand. Supposons $P = 2Q$, on trouve $n < 27$. Si $P = 2,5Q$, qui est un cas assez fréquent, on trouve $n < 12,5$. Si $P = 3Q$, qui est déjà rare, on a $n < 7,5$. Or ces diverses conditions seront presque toujours remplies par le nombre des feuilles.

Ainsi, quand le nombre des feuilles sera au-dessous des limites qui viennent d'être posées, ce qui aura presque toujours lieu, on sera sûr d'avance de rentrer dans le premier cas, et on n'aura même pas besoin pour s'en assurer de comparer les épaisseurs déduites de la formule $m' = Pr'l'$, où r' varie, à celles tirées de la relation $e' = 2r'a$.

Une garniture de ressorts à auxiliaire à trois feuilles plus un auxiliaire, a été construite pour le chemin de fer de l'Ouest, avec une flexibilité de 0,0275 par 1.000 kilogrammes jusqu'à la charge normale maxima de 2.000 kilogrammes. Ils pouvaient aller jusqu'à 4.500 kilogrammes, répondant à l'aplatissement complet et à un allongement de $0^m,005$. Ils pesaient $23^k,50$.

D'autres ressorts à auxiliaire ont été construits dans des circonstances diverses et se sont très-bien comportés.

J'ai observé qu'actuellement $0^m,005$ est à peu près l'allongement correspondant à la limite d'élasticité qui résulte de la charge d'épreuve, et que les ressorts de suspension et de traction travaillent ordinairement à des allongements variant de $0^m,002$ à $0^m,003$ sous la charge normale. On comprend en effet que les oscillations, les surcharges, les inégalités de répartition dans le chargement, la permanence de la charge, etc., empêchent de faire travailler un ressort à sa limite. J'ai observé en outre que le milieu d'un ressort avec auxiliaire éprouvait sous la charge normale un allongement plus fort que les parties étagées de ce même ressort, ou, ce qui revient au même, que tout l'ensemble d'un ressort ordinaire à feuilles de même épaisseur; mais que la présence même de l'auxiliaire empêchait presque absolument cet allongement de s'accroître, ce qui permettait de faire de suite supporter au milieu du ressort

l'allongement définitif, auquel toutes les causes accidentelles que je viens de mentionner peuvent porter le reste du ressort. Une manière assez rationnelle de construire un ressort avec auxiliaire serait donc la suivante : Supposons par exemple que la charge normale d'un ressort de suspension de wagon soit de 2.000 kilogrammes, et que sous cette charge le ressort à feuilles toutes de même épaisseur ait été calculé pour éprouver un allongement de $0^m,0022$. D'après l'étendue des oscillations possibles, des surcharges, etc., je suppose qu'on constate que dans le travail ce ressort puisse être exposé à atteindre 0,003 à 0,0035, par exemple 0,003 d'allongement. Alors on fera le ressort avec auxiliaire de manière que l'allongement du ressort proprement dit, aplati, soit de 0,003; quant à la charge répondant à l'aplatissement, elle sera

$$2000 \times \frac{0,003}{0,0022} = 2727 \text{ kil.}$$

Dans ce cas, le travail habituel du ressort pourrait avoir pour effet, dans les oscillations, de l'amener à l'aplatissement. Du reste, la méthode générale comprend ce cas particulier, puisqu'elle indiquerait, dans l'exemple qui vient d'être donné, un allongement dans l'aplatissement compris entre 0,0022 et 0,005, et une charge correspondante comprise entre 2.000 kilogrammes et 4.545 kilogrammes. Lors même, comme je l'ai déjà dit, qu'on ferait aplatir le ressort avec auxiliaire avec un allongement plus grand que 0,003, on pourrait parfaitement choisir le ressort de manière que les oscillations, etc., ne fassent pas éprouver au milieu du ressort un allongement supérieur à 0,003. J'ai seulement voulu indiquer une des manières rationnelles d'obtenir de suite ce résultat.

Relativement aux ressorts avec auxiliaire, considérés en général, il n'y a pas lieu d'examiner si sous charge les ressorts bâilleront ou ne bâilleront pas, car d'après ce qui a été déjà démontré, un pareil ressort, dans lequel les feuilles ont des épaisseurs égales puis croissantes, ne peut pas bâiller avant d'avoir dépassé l'aplatissement.

Je ferai remarquer, en passant, que le type déjà décrit des ressorts à feuilles d'épaisseurs croissantes, qui travaillent aplatis sous la charge normale, et dont toutes les feuilles éprouvent dans l'aplatissement un même allongement, rentre réellement dans la classe des ressorts à auxiliaire, car les rayons étant croissants, les feuilles ne viennent en contact que successivement. Ce fait est d'autant plus saillant, que souvent ces ressorts se terminent par une ou deux grosses feuilles. Seulement le propre de ces ressorts est que toutes les feuilles sont jointives sous la charge normale, et qu'alors toutes éprouvent les mêmes allongements.

Calcul des ressorts de traction.

Les ressorts de traction se calculent exactement comme ceux de suspension. On peut faire les mêmes types.

Calcul des ressorts de choc.

Quant aux ressorts de choc, ils se calculent aussi d'après les mêmes règles. Seulement si l'on veut qu'ils puissent amortir un choc répondant à une quantité de travail déterminée et à un allongement général donné du ressort, il faudra, d'après ce qui a été démontré à la fin du chapitre premier, qu'ils aient un volume déterminé. On pourra ainsi faire ou le type à feuilles de même épaisseur, ou celui-ci calculé, en déduire, comme cela a été indiqué pour les ressorts de suspension, d'autres ressorts ayant le même volume, mais dont les feuilles auraient des épaisseurs décroissantes ou des épaisseurs croissantes. Voici parmi ce dernier

genre un type nouveau, servant à la fois de ressort de choc et de traction, pour voiture à voyageurs, qui offre des avantages.

Pour satisfaire à la condition du choc, toutes les feuilles, dans l'aplatissement qui est la position extrême du ressort, se trouvent à leur limite d'élasticité, qui sera par exemple $0^m,004$ avec du bon acier, et en même temps pour pouvoir résister à un choc donné, le ressort aura un poids déterminé d'avance, par exemple 80 kilog. Le ressort proprement dit se compose d'un certain nombre de feuilles de même épaisseur, et il satisfait aux conditions suivantes : 1° Ce ressort proprement dit, sous l'effort de traction normal maximum habituel, par exemple sous 1.000 kilogrammes, n'est pas encore courbé en sens inverse; 2° sous cette charge, l'allongement maximum qui a lieu au centre du ressort est assez faible et ne dépasse pas par exemple $0^m,002$ à $0^m,0025$; 3° jusqu'à cette charge normale maximum, la flexibilité qui est constante est suffisamment grande, et est par exemple de $0^m,07$, $0^m,08$, $0^m,09$, $0^m,10$ par 1.000 kilogrammes plus ou moins; et 4° l'étagement est calculé de manière que l'aplatissement ait lieu sous une charge bien supérieure à la charge normale maximum; par exemple, 5.000 ou 6.000 kilogrammes sera la charge répondant à l'aplatissement. Au-dessous du ressort proprement dit se trouvent une ou plusieurs grosses feuilles faisant fonctions d'auxiliaires et qui sont nécessairement en acier, puisque toute la matière travaille à $0^m,004$. Le rayon de la première feuille auxiliaire n'est autre que le rayon du centre du ressort proprement dit sous la charge normale maximum que nous avons prise, par exemple de 1.000 kilogrammes; son épaisseur s'ensuit par la relation $e = 2r\alpha$ où α serait égal ici à $0^m,004$; son étagement s'obtient d'après la

condition que l'aplatissement ait lieu sous la charge déjà mentionnée plus haut et que nous avons prise, par exemple, de 5.000 à 6.000 kilogrammes. Les autres feuilles auxiliaires, s'il y a lieu, s'obtiennent par les conditions suivantes : 1° de compléter le volume nécessaire ; 2° que les épaisseurs soient avec les rayons dans des relations telles que dans l'aplatissement, l'allongement soit de $0^m,004$; et 3° que cet aplatissement ait lieu sous la charge de 5.000 à 6.000 kilogrammes déjà mentionnée ci-dessus.

Un ressort ainsi déterminé offre les avantages suivants : 1° il satisfait au choc, puisqu'il a un poids voulu et que la matière tout entière travaille à $0^m,004$ quand le ressort est aplati ; 2° le choc commence avec une grande douceur, puisque la flexibilité du ressort jusqu'à 1.000 kilogrammes est constante et très-grande, et qu'elle diminue ensuite graduellement. Mais le principal avantage de ces ressorts est pour la traction. On sait que l'effort de traction peut augmenter d'une manière considérable, soit par l'effet des rampes ou des surcharges, du vent ou de toute autre cause ; néanmoins, l'aplatissement n'ayant lieu que sous une charge qui est, par exemple, cinq ou six fois l'effort de traction normal maximum, il n'en résultera, grâce à l'auxiliaire, qu'une différence très-minime dans la flèche du ressort ; par conséquent, les tampons des voitures ne pourront jamais s'écarter que d'une quantité très-faible les uns des autres, ce qui est toujours très-désirable ; de plus, des augmentations même considérables dans l'effort de traction ne donneront que des différences très-petites dans les allongements, au lieu, comme cela arrive souvent dans les ressorts actuels, de les amener, en pareils cas, à leur limite d'élasticité.

Voici deux exemples de ressorts de cette espèce qui

ont été exécutés pour le chemin de fer de l'Ouest (*voir* les n°s 1 et 2 du tableau ci-dessous et pour les dimensions de ces ressorts, la fin du tableau qui termine ce chapitre).

Les meilleurs ressorts que l'on fasse en ce moment ont une flexibilité analogue à celle de ces ressorts au commencement de leur flexion ; mais ils ne vont que jusqu'à 3.000 kilogrammes et souvent à moins ; de plus, ils pèsent tout autant. Appelons n° 3 un de ces ressorts ordinaires. Lorsque l'effort de traction irait en augmentant, on aurait :

	FLEXIONS		
	en passant de 0 à 1.000 kil.	en passant de 1.000 à 3.000 kil.	au delà de 3.000 kil.
	mèt.	mèt.	mèt. kil.
Ressort n° 1	0,095	0,109	0,032 par 1.000
— n° 2	0,076	0,075	0,0227 par 1.000
— n° 3	0,100	0,200	0,100 par 1.000

Quant aux allongements, on aurait :

	ALLONGEMENTS MAXIMA		
	sous 1.000 kil.	sous 2.000 kil.	sous 3.000 kil.
Ressort n° 1	»	»	»
Feuilles de 0m,011	0,002	0,00266	0,00319
Feuilles de 0m,0225	0	0,0012	0,0023
Feuilles de 0m,025	0	0,00096	0,00216
Ressort n° 2.	»	»	»
Feuilles de 0m,013	0,002	0,00235	0,0027
Feuilles de 0m,026	0	0,0007	0,0014
Ressort n° 3	»	»	»
Feuilles toutes de même épaisseur. . .	0,00133	0,00266	0,004

Remarque sur ce chapitre.

Je me suis appliqué dans ce chapitre à indiquer les formes de ressorts qui m'ont paru les plus rationnelles

et les plus avantageuses. Je ne prétends pas dire toutefois que, dans la pratique, certains motifs particuliers ne pourront pas quelquefois conduire à modifier légèrement quelques-uns des résultats obtenus ; toutefois, je pense que cela n'arrivera que rarement et qu'alors le chapitre premier pourra servir utilement de guide dans l'application des modifications que l'on peut être conduit à faire. D'un autre côté, la théorie du chapitre premier peut encore être mise à profit d'une autre manière en recherchant de nouvelles formes, et je pense qu'elle donnera toujours aussi à cet égard des indications utiles.

Voici un résumé des principaux ressorts qui ont été exécutés d'après la théorie exposée dans ce qui précède, jusqu'au commencement de 1851. Depuis, un grand nombre d'autres ont été construits.

Résumé des principaux ressorts qui ont été exé

DÉSIGNATION OU NATURE DES RESSORTS.	NOMBRE DE RESSORTS.	LARGEUR des FEUILLES.	LONGUEUR du RESSORT ou de la première feuille.	CHAR NORMA
Chemin de				
Ressorts de suspension pour wagon de ballast :		mèt.	mèt.	kil
A feuilles d'égale épaisseur	60	0,075	1,000	2.0
Avec une feuille auxiliaire en acier	4	»	»	»
Ressorts de suspension pour wagon à bestiaux :				
A feuilles d'égale épaisseur. (Aplatissement des ressorts sous la charge normale.)	4	0,075	0,930	2.0
A feuilles d'épaisseurs croissantes. (Aplatissement des ressorts sous la charge normale.)	4	»	»	»
A feuilles d'épaisseurs décroissantes. (Aplatissement des ressorts sous la charge normale.)	4	»	»	»
Ressorts de suspension pour wagon-écurie :				
Avec auxiliaire en fer. (Aplatissement sous 2.064 kilog et allongement de 0m,0035.)	4	0,075	0,914	1.3
Avec auxiliaire en bois. (Aplatissement sous 2.064 kilog et allongement de 0m,0035.)	4	»	»	»
Chemin de				
Ressort de suspension pour wagon à houille :				
Avec auxiliaire en fer. (Aplatissement sous 5.568 kilog.).	4	0,075	0,750	3.5
Ressorts de suspension pour voitures à voyageurs :				
A feuilles d'égale épaisseur	plus de 200	0,075	1,55	1.0
Idem. idem.		»	1,25	1.0
Grand ressort de choc et de traction :				
A feuilles d'égale épaisseur	environ 100	0,075	1,720	aplat. sement 4.0
Chemin de				
Grand ressort de choc et de traction :				
Avec 2 grosses feuilles auxiliaires en acier	4	»	1,744	aplat. sement 5 0
Avec 3 grosses feuilles auxiliaires en acier	4	»	1,708	6.0
Ressort de suspension pour tender à marchandises :				
A feuilles d'égale épaisseur	8	0,080	0,922	3.5

…squ'en 1851 d'après la théorie exposée dans ce qui précède.

…EXIBILITÉ ou …LEXION par …00 kilog., d'après formule.	ÉPAISSEUR des FEUILLES.	LONGUEUR de L'ÉTAGE-MENT.	NOMBRE DE FEUILLES.	OBSERVATIONS.
…l'Ouest.				
mèt.	mèt.	mèt.		
0,0275	0,010	0.057	8	Essayés à la machine, leur flexibilité a été de 0^m,027 à 0^m,028. Leur poids de 27^k 50.
»	0,0124	0,085	3	Plus un auxiliaire avec une épaisseur de 0^m,032. La flexibilité a été de 0^m,0285. Le poids est de 24 kilogr.
0,026	0,009	0.0446	10	La moyenne de la flexibilité a été de 0^m,0268. Le poids est de 27 kilogr.
»	»	»	9	Dont deux feuilles de 8 millim., trois de 9 millim., et quatre de 10 millim. La flexibilité a été de 0^m,027. Le poids est de 27 kilogr.
0,024	»	»	10	Dont trois feuilles de 10 millim., trois de 9 millim., et quatre de 8 millim. La flexibilité a varié de 0^m,024 à 0^m,025. Le poids est de 26 kilogr.
…tie 0,035	0,011	0,102	3	Plus un auxiliaire de 0^m,030 d'épaisseur. La flexibilité a été, en moyenne, de 0^m,0352. Le poids est de 16 kilogr.
…ert »	»	»	»	Plus un auxiliaire en bois, de 0^m,060 d'épaisseur. Même flexion que ci-dessus.
…Nord.				
…tie …ert 0,0097	0,010	0,0314	8	Plus un auxiliaire en fer, de 0,032 d'épaisseur. La flexibilité a été de 0^m,0102. Le poids est de 27^k,10.
0,100	0,010	0,0633	9	La flexibilité a été ce qu'elle devait être, 0^m,01 par 100 kilogr. Le poids est de 64 kilogr.
0,103	0,007	0,0454	13	Aux essais, la flexibilité a été de 0^m,103. Le poids du ressort est de 34 kilogrammes.
0,055	0,012	0,0654	13	La flexibilité a varié de 0^m,054 à 0^m,055. Le poids du ressort est de 81 kilogrammes.
…l'Ouest.				
…tie 0,095	0,011	0,0484	7	Plus 2 feuilles auxiliaires, dont une de 22^{mm},5 et une de 25 millim. La flexibilité a été de 95 millim. en moyenne. Le poids est de 34 kilogr.
…ert 0,076	0,013	0,0563	5	Plus 3 feuilles auxiliaires de 0^m,026. La flexibilité a été de 72 millimètres. Le poids des ressorts, 30 kilogr.
0,010	0,011	0,036	11	La moyenne de la flexibilité a été à l'essai de 0,0102. Leur poids est de 42^k,50.

Résumé des principaux ressorts qui ont été exécuté

DÉSIGNATION OU NATURE DES RESSORTS.	NOMBRE DE RESSORTS.	LARGEUR des FEUILLES.	LONGUEUR du RESSORT ou de la première feuille.	CHARGE NORMALE.
Chemin de fe				
Ressorts de suspension pour wagon de ballast :		mèt.	mèt.	kilog.
A feuilles d'égale épaisseur	60	0,075	1,000	2.000
Avec une feuille auxiliaire en acier	4	»	»	»
Ressorts de suspension pour wagon à bestiaux :				
A feuilles d'égale épaisseur (Aplatissement des ressorts sous la charge normale.)	4	0,075	0,930	2.000
A feuilles d'épaisseurs croissantes (Aplatissement des ressorts sous la charge normale.)	4	»	»	»
A feuilles d'épaisseurs décroissantes (Aplatissement des ressorts sous la charge normale.)	4	»	»	»
Ressorts de suspension pour wagon-écurie :				
Avec auxiliaire en fer (Aplatissement sous 2.064 kilog et allongement de 0m,0035.)	4	0,075	0,914	1.300
Avec auxiliaire en bois (Aplatissement sous 2.064 kilog et allongement de 0m,0035.)	4	»	»	»
Chemin de fe				
Ressort de suspension pour wagon à houille :				
Avec auxiliaire en fer. (Aplatissement sous 5.568 kilog.)	4	0,075	0,750	3.500
Ressorts de suspension pour voitures à voyageurs :				
A feuilles d'égale épaisseur	plus de 200	0,075	1,55	1.000
Idem. idem.		»	1,25	1.000
Grand ressort de choc et de traction :				
A feuilles d'égale épaisseur	environ 100	0,075	1,720	aplatissement sous 4.400
Chemin de fer				
Grand ressort de choc et de traction :				
Avec 2 grosses feuilles auxiliaires en acier	4	»	1,744	aplatissement sous 5.000
Avec 3 grosses feuilles auxiliaires en acier	4	»	1,708	6.000
Ressort de suspension pour tender à marchandises :				
A feuilles d'égale épaisseur	8	0,080	0,922	3.500

usqu'en 1851 d'après la théorie exposée dans ce qui précède.

FLEXIBILITÉ ou FLEXION par 1.000 kilog., d'après la formule.	ÉPAISSEUR des FEUILLES.	LONGUEUR de L'ÉTAGEMENT.	NOMBRE DE FEUILLES.	OBSERVATIONS.
le l'Ouest.				
mèt.	mèt.	mèt.		
0,0275	0,010	0.057	8	Essayés à la machine, leur flexibilité a été de 0^m,027 à 0^m,028. Leur poids de 27^k 50.
»	0,0124	0,085	8	Plus un auxiliaire avec une épaisseur de 0^m,[illegible]. La flexibilité a été de 0^m,0285. Le poids est de 24 kilogr.
0,026	0,009	0,0446	10	La moyenne de la flexibilité a été de 0^m,0268. Le poids est de 27 kilogr.
»	»	»	9	Dont deux feuilles de 8 millim , trois de 9 millim., et quatre de 10 millim. La flexibilité a été de 0^m,027. Le poids est de 27 kilogr.
0,024	»	»	10	Dont trois feuilles de 10 millim.. trois de 9 millim., et quatre de 8 millim. La flexibilité a varié de 0^m,024 à 0^m,025. Le poids est de 26 kilogr.
1re partie du ressort 0,035	0,011	0,102	3	Plus un auxiliaire de 0^m,030 d'épaisseur. La flexibilité a été, en moyenne. de 0^m,0352. Le poids est de 16 kilogr.
»	»	»	»	Plus un auxiliaire en bois, de 0^m,060 d'épaisseur. Même flexion que ci-dessus.
du Nord.				
1re partie du ressort 0,0097	0,010	0,0314	8	Plus un auxiliaire en fer, de 0,032 d'épaisseur. La flexibilité a été de 0^m,0[illegible]. Le poids est de 27^k,10.
0,100	0,010	0,0533	9	La flexibilité a été ce qu'elle devait être, 0^m,01 par 100 kilogr. Le poids est de 42 kilogr.
0,103	0,007	0,0454	13	Aux essais, la flexibilité a été de 0^m,102. Le poids du ressort est de 35 kilogrammes.
0,055	0,012	0,0654	12	La flexibilité a varié de 0^m,[illegible] à 0^m,[illegible]. Le poids du ressort est de 81 kilogrammes.
de l'Ouest.				
1re partie du ressort 0,095	0,011	0,0484	7	Plus 2 feuilles auxiliaires, dont une de 22^{mm}.5 et une de 25 millim. La flexibilité a été de 98 millim en moyenne. Le poids est de 34 kilogr.
0,076	0,013	0,0563	5	Plus 3 feuilles auxiliaires de 0^m.026. La flexibilité a été de 72 millimètres. Le poids des ressorts, 80 kilogr.
0,010	0,011	0,036	11	La moyenne de la flexibilité a été à l'essai de 0,0102. Leur poids est de 42^k,50.

CHAPITRE TROISIÈME.

EXPÉRIENCES SUR L'ÉLASTICITÉ DE L'ACIER.

Comme complément de la théorie exposée dans les chapitres précédents, j'ai entrepris, au chemin de fer du Nord, quelques expériences sur l'élasticité de l'acier. L'appareil qui a servi pour ces expériences est la machine à essayer les ressorts du chemin de fer du Nord. Cette machine consiste essentiellement en un plateau très-solide, qui peut monter ou descendre à l'aide d'une vis et de deux forts supports en fonte. Le mouvement de la vis s'opère par une communication, que l'on peut établir ou interrompre à volonté, avec la machine à vapeur qui donne la force motrice à l'atelier; on peut aussi produire un mouvement très-lent à la main. Au-dessous du plateau et entre les supports se trouve un petit chemin de fer sur lequel se meuvent deux petits chariots (*fig.* 12). C'est ordinairement sur ces deux chariots que l'on place les extrémités du ressort à éprouver, dans une position renversée, et on le presse par son milieu à l'aide du plateau mobile et d'une cale interposée entre les deux. La flexion s'obtient à l'aide d'une division tracée en millimètres et qui se trouve sur un des supports le long desquels se meut le plateau. Quand à la charge, elle se détermine très-simplement. En effet, le petit chemin de fer, supportant les chariots et qui reçoit directement la pression, est supporté lui-même par une combinaison de leviers comme une bascule, et de même aussi, à l'extrémité de cette série de leviers, se trouve un plateau de balance où l'on met des poids. Il suffit d'équilibrer la balance pour avoir la charge exercée sur le ressort.

Pour les expériences dont il est ici question, voici camment les choses étaient disposées. Sur chacun des chariots, on avait solidement fixé, à l'aide d'un fort boulon, un coussinet de rail, dont on avait abattu la partie postérieure. C'est sur les arêtes de ces coussinets (*fig.* 13), en B et en B' que reposait la feuille d'acier AA' soumise aux expériences, et que l'on faisait fléchir en la pressant par son milieu. Pour être sûr que la pression s'exerçât bien au milieu de la feuille, on avait interposé entre le plateau mobile P et la feuille, une cale en bois C, d'environ $0^m,30$ de haut sur $0^m,10$ d'équarrissage, et terminée inférieurement par un boulon *b*, dont l'arête seule reposait sur la feuille. De plus, les chariots étaient placés d'avance aux distances convenables.

Le problème était le suivant : Pour des allongements de 0,002, 0,003, 0,004, 0,005, etc., déterminer les coefficients d'élasticité et les allongements permanents. Pour cela, on cherchait d'avance les flexions à faire subir à la feuille pour avoir des allongements au milieu, de 0,002, 0,003, 0,004, etc. En appelant 2L la longueur de la feuille comprise entre les points d'appui, on avait :

$$F = \frac{2L^2\alpha}{3e}.$$

On fixait ainsi d'avance les divers points de l'échelle auxquels il fallait faire descendre le plateau mobile. On avait ainsi chaque fois ce que j'ai appelé dans les tableaux qui suivent les allongements approximatifs calculés d'avance ; en effet, les véritables allongements n'étaient plus les mêmes, parce que, à mesure que la feuille fléchissait, sa longueur entre les points d'appui augmentait. On mesurait donc chaque fois cette longueur développée, en retranchant de la longueur totale de la feuille les quantités dont elle débordait les

points d'appui, quantités que l'on mesurait chaque fois. On avait alors les allongements réels α par la formule $\alpha = \frac{3eF}{2L^2}$. On avait ensuite le moment d'élasticité et le coefficient d'élasticité par les formules

$$M = \frac{QL^3}{3F} \quad \text{et} \quad E = \frac{4QL^3}{ae^3F}.$$

Avant d'avoir soumis la feuille à aucune pression, on avait mesuré exactement la hauteur h du dessous de la feuille au-dessus du plan du petit chemin de fer. Chaque fois qu'une certaine charge avait été exercée sur la feuille, une fois la charge enlevée, on prenait de nouveau cette mesure. On avait ainsi chaque fois la flèche permanente φ, et l'allongement permanent ε par la formule

$$\varepsilon = \frac{3e\varphi}{2L^2}.$$

Quant à l'allongement absolu α, pour en déduire l'allongement élastique α', il faut le corriger de l'allongement permanent ε, et on a :

$$\alpha' = \frac{3e(F - \varphi)}{2L^2}.$$

De même, le coefficient d'élasticité E', qui est le véritable coefficient d'élasticité, s'obtient par la formule

$$E' = \frac{4QL^3}{ae^3(F - \varphi)}.$$

Pour remédier à l'incertitude relative au moment précis où le contact commence, entre la cale et le plateau mobile, on établissait chaque fois le contact sous une charge invariable de 5 kilogrammes mesurée sur la balance. En mesurant, avant et après l'application

de cette charge, la hauteur du dessous de la feuille au-dessus du plan du petit chemin de fer, on avait la flexion qu'elle produit. De cette manière, dans chaque expérience on pouvait corriger tout à la fois les flexions observées et les pressions correspondantes, de manière à avoir ces deux éléments à partir de la position tout à fait libre de la feuille.

Ces expériences ont été faites sur des feuilles de dimensions et de matières diverses. Les résultats en sont consignés dans les tableaux suivants.

Aux notations déjà expliquées ci-dessus et qui indiquent ce que signifient α, E, ε, α' et E', j'ajouterai que

1° γ signifie l'allongement approximatif calculé d'avance;

2° 2L la longueur développée de la feuille entre les points d'appui;

3° 2Q la charge;

4° H la division correspondante de l'échelle;

5° h la hauteur du dessous de la feuille au-dessus du plan du petit chemin de fer, une fois la charge enlevée.

1er TABLEAU. **Acier fondu de M. Jackson, trempé et recuit comme d'ordinaire.** (Feuille de 0m,012 sur 0m,09.)

Nos des expér.	RÉSULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
		mèt.	kil.	mèt.	mèt.
—	0	0,840	0	0,4925	0,29325
1	0,002	0,840	382,0	0,4735	0,29325
2	0,003	0,842	593,5	0,463	0,29325
3	0,004	0,843	780,0	0,453	0,29325 faible.
»	0,004	0,843	»	0,453	0,29325 faible.
4	0,005	0,847	970,0	0,4435	0,293
5	0,006	0,848	1.128,0	0,434	0,292
6	0,006	0,848	»	0,43325	0,29175
7	0,003	»	536,0	0,463	0,29175
8	0,003	»	576,0	0,461	0.29175
9	0,006	»	»	0,435	0,29175
10	0,006	»	»	0,432	0.29175
	RÉSULTATS CALCULÉS.				
	α	E	ε	α'	E'
1	0,001939	19156	0	0,001939	19156
2	0,002996	19305	0	0.002996	19305
3	0,004002	18979	0	0,004002	18979
4	0,004918	19336	0,0000255	0,0048926	19136
5	0,005857	18901	0,0001275	0,0057321	19400
6	0,005932	»	0,0001531	0,0057822	»
7	»	»	»	0,0028436	18558
8	»	»	»	0,0030467	18584
9	»	»	»	0,0056070	»
10	»	»	»	0,0059073	»

2e TABLEAU. **Acier fondu de M. Jackson, trempé et recuit comme d'ordinaire.** (Feuille de 0m,010 sur 0m,075.)

Nos des expér.	RÉSULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
—	0	0,760	0	0,489	0,293
1	0,002	0,762	285,0	0.4695	0,293
2	0,003	0,763	411,5	0,460	0,293
3	0,004	0,763	545,0	0,4505	0,293 faible.
4	0,005	0,764	680,5	0,4405	0,292
	0,005	»	»	0,4405	0.292
5	0,006	0,768	768,5	0,431	0,2905
	0,006	»	»	0,431	0,2905 faible.
	On retourne la feuillle sur l'autre face et alors on a :				
	0	»	»	»	0,296
	0,006	0,763	»	0,4335	0,2915
	0,003	»	»	0,460	0,292
	0,006	»	»	0,438	0,292
	RÉSULTATS CALCULÉS.				
	α	E	ε	α'	E'
1	0.0020150	21555	0	0,0020150	21555
2	0,0029888	21010	0	0,0029888	21010
3	0.0039679	20960	0	0 0039679	20960
4	0,0049855	20857	0,00010388	0,0018827	21296
5	0,0059001	20007	0,0002597	0,0056458	20908

3° TABLEAU. **Acier fondu de M. Jackson, trempé et recuit comme d'ordinaire.** (Feuille de 0m,008 sur 0m,075.)

Nos des expér.	RÉSULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
		mèt.	kil.	mèt	mèt.
—	0	0,659	0	0,487	0,293
1	0,003	0,659	273,5	0.460	0,293
2	0,004	0,660	402,5	0,450	0,293
3	0,006	0,663	477,5	0,442	0,29275
4	0,005	0,669	564,0	0,431	0,29125
5	0,0065	0,669	604,5	0,427	0,290
»	0,0065	»	»	0,427	0,290
6	0,0065	»	600,0	0,427	0,2895
»	0,0065	»	»	0,427	0,2895
7	0,007	0,671	617,0	0,42275	0,2885
»	0,007	»	»	0,4[illegible]2	0,288
»	0	»	0	0,4825	0,287
8	0,002	0,661	197,5	0,463	0,287
	RÉSULTATS CALCULÉS.				
	α	E	ε	α'	E'
1	0,0029842	18874	0	0,0029842	18874
2	0.0040771	20361	0	0,0040701	20361
3	0.0049139	201[illegible]3	0,000027632	0.0048866	20246
4	0,0060059	19633	0,00019342	0,0058182	20266
5	0,0064349	19640	0,00033158	0,0061131	20673
6	0,0064349	19494	0,00038685	0,0060595	20700
7	0,00[illegible]8497	18888	0,00049737	0.00[illegible]36[illegible]9	20451
8	»	»	»	0,0021423	19043

4° TABLEAU. **Acier fondu de M. Jackson, trempé et recuit comme d'ordinaire.** (Feuille de 0m,006 sur 0m,05.)

Nos des expér.	RÉSULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
—	0	0,560	0	0,4845	0,292
1	0,002	0,5605	86,5	0,467	0,292
2	0,003	0,5[illegible]025	126,0	0,458	0,292
3	0,004	0,564	175,5	0,449	0,2915
4	0,005	0,566	215,0	0,441	0,2915
»	0,005	»	»	0,439	0,2915
5	0,006	0,570	250,0	0,430	0,2905
6	0,006	0,569	257,0	0,430	0,2905
7	0,007	0,569	280,0	0,42175	0.28925
»	9,007	»	»	0,42175	0,28925
8	0,003	0,560	129,5	0,45525	0,289
	RESULTATS CALCULÉS.				
	α	E	ε	α'	E'
1	0,0020053	20147	0	0,0020053	20147
2	0,0030394	19353	0	0,00[illegible]0[illegible]94	19353
3	0,004[illegible]76	20531	0,0000[illegible]7398	0,00[illegible]96[illegible]1	20824
4	0,004888[illegible]	20715	0,0[illegible]005[illegible]398	0,0048321	20986
5	0,0060388	196[illegible]5	0,000[illegible]7219	0,005872[illegible]	20222
6	0,0060600	20109	0,0001721[illegible]	0,0058932	20678
7	0,0069774	19028	0,00031569	0,0060716	19901
8	»	»	»	0,0030134	20055

5° TABLEAU. **Acier cémenté non corroyé, trempé et recuit comme d'ordinaire.** (Feuille de $0^m,010$ sur $0^m,075$.)

Nos des expér.	RÉSULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
		mèt.	kil.	mèt.	mèt.
—	0	0,760	0	0,48925	0,29225
1	0,002	0,761	260	0,[illegible]69	0,29225
2	0,003	0,761	385	0,460	0,292
3	0,004	0,761	525	0,4505	0,292 faible.
4	0,005	0,760	648	0,4405	0,291
5	0,005	0,761	645	0,4405	0,291
6	0,006	0,763	742	0,431	0,28925
»	0,006	»	»	0,431	0,289 fort.
7	0,007	0,768	795	0,4215	0,286 faible.
»	0,007	»	»	0,421	0,285
»	0,007	»	»	0,4205	0,285
»	0,007	»	»	0,4215	0,285
	RÉSULTATS CALCULÉS.				
	α	E	ε	α'	E'
1	0,0020980	19297	0	0,0020980	19297
2	0,00[illegible]304	19336	0,00002597	0,00[illegible]0045	19503
3	0,0040147	19903	0,00002597	0,00[illegible]9888	200[illegible]2
4	0,0050641	19150	0,00012984	0,0049312	19962
5	0,0050507	19136	0,00012984	0,0049212	19948
6	0,0060033	18861	0,00031163	0,0056942	19885
7	0,0068919	177[illegible]9	0,00064924	0,0062561	19520

6° TABLEAU. **Acier cémenté, non corroyé, trempé et recuit comme d'ordinaire.** (Feuille de $0^m,008$ sur $0^m,075$.

Nos des expér.	RÉSULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
—	0	0,659	0	0,4[illegible]75	0,2925
1	0,002	0,659	217,0	0,467	0,29225
2	0,003	0,659	288,5	0,460	0,292
3	0,004	0,660	386,5	0,450	0,291
»	0,004	»	»	0,4495	0,291
4	0,005	0,661	448,0	0,4415	0,289
5	0,006	0,667	485,0	0,431	0,[illegible]835
»	0,006	»	»	0,4297	0,2[illegible]25
6	0,003	0,662	207,0	0,4575	0,[illegible]825
	RÉSULTATS CALCULÉS.				
	α	[illegible]	ε	α'	E'
1	0,00[illegible]2058	19723	0,000028185	0,0[illegible]2[illegible]3[illegible]2	199[illegible]
2	0,0030[illegible]95	19[illegible]47	0,000055264	0,002[illegible]842	19909
3	0,004[illegible]3[illegible]2	192[illegible]	0,000[illegible]79	0,00[illegible]9069	20085
4	0,00[illegible]5	1[illegible]312	0,[illegible]0038685	0,0016[illegible]90	19820
5	0,0060959	16584	0,00099[illegible]75	0,0051249	19726
6	0,0032858	13033	0,00110530	[illegible],0021906	19549

7° TABLEAU. **Acier cémenté, non corroyé, trempé et recuit comme d'ordinaire.** (Feuille de $0^m,005$ faible sur $0^m,045$.)

Nos des expér.	RÉSULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
			kil.	mét.	mét.
—	0	0,500	0	0,484	0,292
1	0,002	0,502	51,5	0,4665	0,292 faible.
2	0,003	0,503	77,5	0,458	0,29175
3	0,004	0,504	95,0	0,451	0,291
4	0,005	0,508	117,5	0,4415	0,290
5	0,006	0,510	136,0	0,432	0,2885
»	0,006	»	»	0,4305	0,28825
»	0,006	»	»	0,4[illegible]05	0,288 fort.

L'incertitude sur l'épaisseur bien exacte de cette feuille m'a empêché d'en déduire, comme pour les autres, le tableau des résultats calculés.

8° TABLEAU. **Acier cémenté, corroyé, trempé et recuit comme d'ordinaire.** (Feuille de $0^m,010$ sur $0^m,075$, ayant une paille, mais dans le sens de sa longueur.)

Nos des expér.	RÉSULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
—	0	0,650	0	0,48925	0,292
1	0,002	0,650	291,5	0,475	0,2915
2	0,003	0,650	419,5	0,468	0,291
3	0,004	0,650	549,0	0,461	0,2895
»	0,004	»	»	0,460	0,289
»	0,004	»	»	0,462	0,289
	RÉSULTATS CALCULÉS.				
	α	E	ε	α'	E'
1	0,0020237	18726	0,00007[illegible]006	0,0019527	19[illegible]07
2	0,0030177	18071	0,00011201	0,0028757	18964
3	0,0040118	17790	0,00035503	0,0036568	19517

9e TABLEAU. **Acier naturel, trempé et recuit comme d'ordinaire.** (Feuille de 0m,01033 sur 0m,075, dont les bouts refoulés sont placés en dehors des points d'appui.)

Nos des expér.	RÉSULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
		mét.	kil.	mét.	mét.
—	0	0,650	0	0,48975	0,2925
1	0,002	0,650	389,5	0,474	0,2925
2	0,003	0,650	5 0,5	0,4685	0,29225
3	0,004	0,650	690,0	0,4605	0,29075
4	0,005	0,650	778,5	0,45475	0,28875
»	0,005	»	»	0,454	0,2885
5	0,005	0,650	810,0	0,453	0,288
»	0,005	»	»	0,45425	0,288
	RESULTAS CALCULES.				
	α	E	ε	α'	E′
1	0,0023105	20537	0	0,0023105	20537
2	0,0031173	20732	0,000036675	0,0030807	20979
3	0,0042909	19590	0,00025672	0,0040342	20837
4	0,0051344	18472	0,00055012	0,0045843	20688
5	0,0053912	18304	0,00066014	0,0047310	20658

10e TABLEAU. **Acier fondu, trempé comme d'ordinaire et très-peu recuit.** (Feuille de 0m,010 sur 0m,075.)

Nos des expér.	RÉSULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
—	0	0,760	0	0,4895	0,292
1	0,002	0,761	278,0	0,4695	0,292
2	0,003	0,761	410,0	0,460	0,292
3	0,004	0,763	539,0	0,4505	0,29175
4	0,005	0,765	661,0	0,4405	0,291
5	0,006	0,767	760,0	0,431	0,290
6	0,007	0,771	881,5	0,421	0,288
»	0,007	»	880,0	0,421	0,288
7	0,008	0,776	950,0	0,411	0,2865
8	0,008	»	940,0	0,411	0,28625
9	0,008	»	930,0	0,411	0,286
	RÉSULTATS CALCULÉS.				
	α	E	ε	α'	E′
1	0,0020721	20420	0	0,0020721	20420
2	0,0030563	20417	0	0,0030563	20417
3	0,0040194	20463	0,000025901	0,0039937	20605
4	0,0050237	20131	0,00010360	0,0049212	20551
5	0,0059665	19540	0,00020721	0,0057625	20232
6	0,0069141	19660	0,00041442	0,0065103	20889
7	0,0078216	18850	0,00056983	0,0072736	20270
8	0,0078216	18652	0,00059573	0,0072487	20126
9	0,0078216	18452	0,00062163	0,0072238	19981

11e **TABLEAU. Acier fondu, trempé comme d'ordinaire et très-peu recuit.** (Feuile de 0m,010 sur 0m,075.)

Nos des expér.	RÉSULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
		mèt.	kil.	mèt.	mèt.
—	0	0,762	0	0,4895	0,29175
1	0,0035	0,765	450,5	0,454	0,29175
2	0,005	0,769	615,0	0,4405	0,2915
3	0,006	0,771	724,0	0,430	0,29075
»	»	0,799	99[illegible],0	0,3845	»
4	»	0,811	1.020,0	0,3625	0,269
	Cette feuille n'étant pas encore brisée, on l'a rompue à coups de masse. La cassure était grisâtre et à grains brillants. Elle n'offrait que sur une faible partie de son contour la zone brillante qui est un indice de la douceur du métal.				
	RÉSULTATS CALCULÉS.				
	α	E	ε	α′	E′
1	0,0036796	18938	0	0,003696	18938
2	0,0049716	19026	0,000025883	0,0049462	19123
3	0,0060056	18589	0,00010333	0,0059047	18907
4	0,011585	14280	0,0023508	0,0095101	17397

12e **TABLEAU. Acier fondu, trempé comme d'ordinaire et ayant un fort recuit.** (Feuille de 0m,010 sur 0m,075.)

Nos des expér.	RÉSULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
—	0	0,766	0	0,4885	0,29175
1	0,002	0.767	239,5	0.4695	0,29175
2	0,003	0,768	371,0	0,459	0,29175
3	0,004	0,770	475,0	0,4505	0,2915
4	0,005	0,772	579,0	0,4405	0,29125
5	0,006	0,775	715,0	0,430	0,291
6	0,007	0,780	797,0	0,421	0,290
»	0,007	»	»	0,4205	0,290
7	0,008	0.785	859,0	0,411	0,287
»	0,008	»	»	0,41175	0,28675
»	0 008	»	»	0,412	0,2865
»	0,008	»	»	0,4115	0,2865
	RÉSULTATS CALCULÉS.				
	α	E	ε	α′	E′
1	0,0019378	18959	0	0,0019378	18959
2	0,003009	18990	0	0,003009	18990
3	0,0038455	19022	0,000025564	0,0038202	19117
4	0,0048323	18500	0,000051129	0,0047820	18624
5	0,0058439	18964	0,000076698	0,0057690	19210
6	0,0066568	18677	0,00017895	0,0064842	19175
7	0,0075459	17872	0,00048572	0,0070834	19039

13e TABLEAU. **Acier fondu, trempé comme d'ordinaire et ayant un fort recuit.** (Feuille de $0^m,010$ sur $0^m,075$.)

Nos des expér.	RÉSULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
		mét.	kil.	mét.	mét.
—	0	0,756	0	0,4885	0,29175
1	0,002	0,757	242,5	0,4695	0,2915
»	0,002	»	»	0,4[illegible]9	0,2915
2	0,0035	0,762	429,0	0,4[illegible]55	0,29125
3	0,005	0,765	616,0	0,4405	0,291
4	0,006	0,770	716,5	0,431	0,291
5	0,008	0,779	874,0	0,411	0,288

Cette feuille, brisée à coups de masse, a offert une cassure plus blanche que le no 11, et à grain plus serré; la cassure est plus conchoïde. Tout son contour est bordé par une zone soyeuse analogue à celle du cuivre rouge et d'un blanc argentin, indice de la douceur du métal.

Nos des expér.	RÉSULTATS CALCULÉS.				
	α	E	ε	α'	E'
1	0,0019894	18455	0,0[illegible]0026245	0,0019642	18701
2	0,0034617	18887	0,0000[illegible]2490	0,0034100	19173
3	0,0049212	19182	0,00007[illegible]735	0,0048143	19455
4	0,005[illegible]1[illegible]8	189[illegible]3	0,0 0078735	0,0057450	19213
5	0,0076626	17771	0,00039367	0,0072919	18674

14e TABLEAU. **Acier fondu, trempé comme d'ordinaire et ayant un recuit extrêmement fort.** (Feuille de $0^m,010$ sur $0^m,075$.)

Nos des expér.	RÉSULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
—	0	0,760	0	0,489	0,2925
1	0,0035	0,762	435,5	0,4555	0,29225
2	0,[illegible]05	0,76[illegible]	625,5	0,4[illegible]05	0,292
3	0,006	0,770	740,0	0,4305	0,291
»	0,00[illegible]	»	»	0,4 05	0,291
4	0,008	0,779	880,0	0,411	0,28675
»	0,008	»	»	0,411	0,28625
»	0,008	»	»	0,411	0,286
»	0,008	»	»	0,411	0,28575
»	0,008	»	»	0,410	0,28533
5	0,008	0,781	855,0	0,411	0,285

Cette feuille, rompue à coups de masse, a présenté une cassure un peu plus blanche encore que le no 13 et à grain extrêmement serré. La zone argentine est extrêmement développée.

Nos des expér.	RÉSULTATS CALCULÉS.				
	α	E	ε	α'	E'
1	0,00[illegible]4617	1917[illegible]	0,0000[illegible]5979	0,00[illegible]43[illegible]9	19[illegible]17
2	0,0[illegible]49725	1924[illegible]	0,0[illegible]00[illegible]1939	0,0049212	19447
3	0,0059200	192[illegible]0	0,00015582	0,0057683	19756
4	0,0077121	17778	0,000597[illegible]0	0,[illegible]0714[illegible]5	19193
5	0,0076726	17406	0,00077 09	0,[illegible]069349	1925[illegible]

15e TABLEAU. Acier fondu, trempé et recuit comme d'ordinaire.
(Feuille de 0m,012 sur 0m,09.)

Nos des expér.	RÉSULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
		mét.	kil.	mét.	mét.
—	0	0,840	0	0,491	0,29175
1	0,003	0,840	605	0,461	0,29175
2	0,004	0,841	8[illegible]0	0,451	0,2915
3	0 005	0,843	987	0,441	0,29075
»	0,005	»	»	0,441	0,29075
»	0,005	»	»	0,441	0,29075
	RÉSULTATS CALCULÉS.				
	α	E	ε	α'	E'
1	0,00.0612	19214	0	0,0030612	19214
2	0.0010719	19124	0,000025510	0,0040465	19244
3	0,0050658	19010	0,00010204	0,0049645	19398

16e TABLEAU. Acier fondu, trempé et recuit comme d'ordinaire.
(Feuille de 0m,00625 sur 0,65.)

Nos des expér.	RÉSULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
—	0	0,562	0	0,485	0,292
1	0,0025	0.564	125,0	0,46325	0,292
2	0,004	0.566	195,2	0.451	0.292 faible.
3	0.005	0,568	232,0	0,443	0,29133
»	0,005	»	»	0,443	0.29133
4	0,006	0,574	265,0	0,435	0,29033
»	0.006	»	»	0.43175	0,29020
»	0.006	»	»	0.435	0,290
»	0,005	»	»	0,442	0.290
	RÉSULTATS CALCULÉS.				
	α	E	ε	α'	E'
1	0,0025641	21116	0	0,0025641	21116
2	0,0039799	21352	0	0.0039799	21352
3	0,0048818	20731	0,000076714	0.0048061	21062
4	0,0059908	20528	0,00019295	0,0055019	21232

17e TABLEAU. **Acier fondu, à l'état naturel, c'est-à-dire n'ayant subi ni trempe, ni recuit, ni martelage.** (Feuille de 0m,010 sur 0m,075.)

Nos des expér.	RESULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
		mèt	kil.	mèt.	mèt.
—	0	0,758	0	0,487	0,29033
1	0,002	0.758	242,0	0,4695	0,29033
2	0,003	0,759	368,0	0,457	0,288
3	0,004	0.758	400,0	0,45025	0,284
4	0,003	0,759	320,0	0,457	0,284
	RÉSULTATS CALCULÉS.				
	α	E	ε	α'	E'
1	0.0018275	20075	0	0,0018275	20075
2	0,0031246	17879	0,00024331	0,0028819	19384
3	0,0038377	15801	0,00066102	0,0031767	19089
4	0,0031246	15547	0,00066102	0,0024653	19704

18e TABLEAU. **Acier fondu, trempé, mais non recuit et non redressé au marteau.** (Feuille de 0m,010 sur 0m,075.)

Nos des expér.	RÉSULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
—	0	0,760	0	0,48466	0,28766
1	0,002	0.760	235.0	0.467	0,28766
2	0,003	0,760	330,0	0,460	0,28766
3	0,004	0,760	450,5	0,4505	0,287
4	0,005	0,762	571,5	0,44025	0,286
5	0,005	0,763	562,5	0,4405	0,286
	RÉSULTATS CALCULES.				
	α	E	ε	α'	E'
1	0,0018345	19472	0	0,0018345	19472
2	0,0025616	19581	0	0,0025616	19581
3	0,0035485	16297	0,000068559	0,0034799	19677
4	0,0045891	18979	0,00017244	0.0044181	19716
5	0,0045513	18860	0,00017244	0,0043802	19597

19ᵉ TABLAU. **Acier fondu, trempé et recuit fortement, mais non redressé à coups de marteau.** (Feuille de 0ᵐ.01025 sur 0,075.)

Nᵒˢ des expér.	RESULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
		mèt.	kil.	mèt.	mèt.
—	0	0,760	0	0,4715	0,275
1	0,002	0,760	276,5	0,451	0,275
2	0.003	0,763	400,0	0,4415	0,275
3	0,004	0.767	522,0	0,432	0,275
4	0.005	0,769	642,0	0,422	0.27475
5	0.006	0,773	745,0	0,4125	0,27433
6	0.007	0,776	810,0	0.404	0,27225
»	0,007	0,773	812,0	0,40375	0,273
»	0.007	»	»	0,403	0,273 faible.
7	0,008	0,784	870,0	0,394	0,27025
»	0,008	»	857,0	0,394	0,270
8	0,008	0,785	857,0	0,394	0,26966
	RESULTATS CALCULÉS.				
	α	E	ε	α'	E'
1	0,0021828	18327	0	0,0021828	18327
2	0,0031692	18332	0	0.0031692	18332
3	0,0041294	18457	0	0,0041294	18457
4	0.0051479	18256	0,000026619	0,0051219	18349
5	0.0060725	18053	0,000071338	0,0060035	18260
6	0,0068937	17357	0,00018633	0,0067150	17819
7	0,0077543	16745	0,00050576	0,0072791	17838
8	0,0077346	16558	0,00056858	0,0072017	17783

20ᵉ TABLEAU. **Acier corroyé de Saint-Antoine (Ardèche), trempé et recuit, mais non martelé.** (Feuille de 0ᵐ,012 sur 0ᵐ,076.)

Nᵒˢ des expér.	RÉSULTATS BRUTS.				
	γ	2L	2Q	H	h
—	0	0,838	0	0,49425	0,295
1	0,002	0 838	352,0	0,474	0,295
2	0,003	0,838	520,0	0,4645	0,295
3	0.004	0.8 8	669,0	0,454	0,293
»	0,004	0.838	»	0,4535	0,293
4	0,005	0,840	776,5	0.4445	0,2905
5	0,006	0,843	857,0	0.4355	0,2875
»	0,006	»	855,0	0,4355	0,287
»	0,006	»	»	0.4355	0,287
	RÉSULTATS CALCULÉS.				
	α	E	ε	α'	E'
1	0,0020762	19473	0	0,0020762	19473
2	0,0030502	19581	0	0,0030502	19581
3	0,0041268	18620	0,00020506	0,0039217	19593
4	0,0050765	17610	0,00046138	0,0046174	19362
5	0,0059523	16636	0,00076896	0,0051924	19070

Voici les conséquences principales qui ressortent de ces expériences.

L'acier fondu, trempé et recuit au-dessous du rouge lumineux dans l'obscurité, commence à éprouver des allongements permanents sensibles, à une limite d'allongement proportionnel élastique, qui varie de 0,004 à 0,005. Pour des allongements de 0,006, 0,007 et 0,008, l'allongement permanent augmente, mais n'est jamais considérable. Pour des allongements qui ne dépassent pas 0,005 à 0,006, la répétition d'un même allongement élastique n'influe plus sensiblement sur l'allongement permanent, et au delà de 0,006 cette influence est toujours très-faible.

L'acier non trempé éprouve beaucoup plus tôt des allongements permanents, et ceux-ci sont bien plus grands. Le martelage paraît aussi avoir pour effet d'abaisser la limite à laquelle les allongements permanents commencent à se manifester.

Pour l'acier cémenté non corroyé, cette limite est comprise entre 0,003 et 0,004 d'allongement élastique; de plus, les allongements permanents sont plus considérables.

Pour l'acier corroyé, cette limite est en général inférieure; cependant une des feuilles soumises aux expériences n'a commencé à se déformer d'une manière permanente qu'après un allongement sous charge de 0,004.

Le coefficient d'élasticité n'a pas toujours été le même; cependant en adoptant le chiffre 20.000 kilogrammes par millimètre quarré, l'erreur ne sera jamais considérable.

J'ai commencé de plus une série d'expériences propres à constater l'influence du temps ou de la permanence des charges.

La disposition employée consiste en une traverse de bois *tt* (*fig.* 14), dont la surface est parfaitement dressée; elle porte deux supports *ss* en forme d'équerres, sur lesquels est placée la feuille d'acier, qui est pressée en son milieu par un étrier en fer *ee*, retenu par une pièce transversale et par deux écrous.

Neuf de ces appareils et neuf feuilles mises ainsi en expérience ont donné au bout de quinze jours les résultats suivants :

	NUMÉROS des tableaux precédents auxquels se rapportent les feuilles mises en experience.	ALLONGEMENT de la feuille mise en place.	FLÈCHE persistante après l'enlèvement de l'étrier
Acier fondu. . . .	1	0,0025	0
Id.	3	0,0025	0
Id.	12	0,0025	0
Id.	10	0.003	0
Id.	16	0.003	0
Id.	2	0.004	0
Id.	4	0,005	0,00066
Id.	15	0,005	0.00025
Acier cémenté. . .	5	0,004	0,0005

Ces feuilles doivent rester ainsi pendant fort longtemps et seront examinées de temps en temps.

Comme conséquence pratique, il semble résulter de ces expériences que les allongements qu'il convient de ne pas dépasser pour l'acier, peuvent varier de 0,002 à 0,003, suivant les qualités du métal sous la charge normale, ou dans la position extrême à laquelle les surcharges et les oscillations puissent avoir pour effet d'amener le ressort. Dans les meilleurs ressorts faits jusqu'à présent, l'acier travaille habituellement à environ 0,0022 sous la charge normale. Il résulte aussi de ce qui a été dit relativement au mouvement oscillatoire des ressorts, que l'augmentation que les oscillations

produisent dans l'allongement est d'autant plus forte que le ressort est plus roide. En conséquence, il convient de prendre une limite d'autant moins élevée pour l'allongement, que le ressort est moins flexible.

On peut remarquer, en passant, que dans les expériences qui viennent d'être décrites on a fait subir à l'acier des allongements qui ont été jusqu'à 0,007, 0,008 et même 0,0095; ce qui correspond à environ 140 kilog., 160 kilog., et même 190 kilogrammes par millimètre quarré, sans que l'acier rompît. Ce fait, très-curieux en lui-même, mérite d'être étudié à part, et je me propose de le faire.

NOTE.

—

Démonstration des formules de la flèche et de la flexion d'un ressort quelconque sous charge.

Soit ρ le rayon de courbure sous charge en un point quelconque de la maîtresse feuille. On a généralement

$$\frac{1}{\rho} = a + b\lambda,$$

en faisant, pour abréger,

$$a = \frac{\frac{M}{r} + \frac{M_1}{r_1} + \frac{M_2}{r_2} + \text{etc.} - QL}{M + M_1 + M_2 + \text{etc.}}$$

et

$$b = \frac{Q}{M + M_1 + M_2 + \text{etc.}}.$$

Si l'on pose

$$\frac{dy}{dx} = p,$$

on a

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{dp}{dx}}{(1+p^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

Or

$$\frac{dp}{dx} = \frac{dp}{d\lambda}\frac{d\lambda}{dx}.$$

Mais on peut admettre que $\frac{d\lambda}{dx} = 1$ et écrire $\frac{dp}{dx} = \frac{dp}{d\lambda}$. On a donc

$$\frac{\frac{dp}{d\lambda}}{(1+p^2)^{\frac{3}{2}}} = a + b\lambda.$$

En intégrant une première fois et désignant par C une constante, on a

$$(\beta)\qquad \frac{p}{\sqrt{1+p^2}} = C + a\lambda + \frac{b}{2}\lambda^2.$$

Il s'agit d'intégrer une seconde fois. Or

$$p = \frac{dy}{dx} \quad \text{et} \quad \frac{p}{\sqrt{1+p^2}} = \frac{dy}{\sqrt{dx^2+dy^2}} = \frac{dy}{d\lambda};$$

donc

$$\frac{dy}{d\lambda} = C + a\lambda + \frac{b}{2}\lambda^2,$$

et, en intégrant et appelant C' une seconde constante, on a

$$(\gamma)\qquad y = C' + C\lambda + \frac{a}{2}\lambda^2 + \frac{b}{6}\lambda^3.$$

Les intégrations qui viennent d'être faites supposent que a et b sont constants et par conséquent que le rayon de fabrication et l'épaisseur ne varient pas d'un point à l'autre d'une même feuille. On verra tout à l'heure comment on ferait dans le cas contraire.

L'équation (γ), avec les valeurs convenables données aux coefficients et aux constantes, représente le lieu géométrique des différentes parties de la maîtresse feuille.

On voit tout d'abord que quand λ est assez petit, c'est-à-dire dans le voisinage du milieu du ressort, la courbe se confond sensiblement avec une parabole dont l'axe serait parallèle à celui du ressort.

Il s'agit maintenant de déterminer, pour les différents intervalles de la maîtresse feuille, la valeur des constantes C et C'. A cet effet, je suppose que $n+1$ soit le nombre des feuilles et je pose les notations suivantes : je désigne par A_n et B_n les valeurs particulières de a et de b pour le premier étage de la maîtresse feuille à partir du centre, c'est-à-dire celui qui couvre toutes les autres lames; puis par A_{n-1} et B_{n-1} les valeurs de a et de b pour le deuxième étage de la maîtresse feuille, là où elle couvre $n-1$ feuilles et ainsi de suite. Je désigne en outre par L_n, L_{n-1}, L_{n-2}, etc., les demi-longueurs de la feuille inférieure, de la suivante, etc. Enfin j'appelle C_n, C'_n; C_{n-1}, C'_{n-1}, etc., les valeurs correspondantes des constantes C et C'.

En observant que pour le premier étage de la maîtresse feuille on doit avoir, pour $\lambda = 0$, $p = 0$ et $y = 0$, on tire des équations (β) et (γ),

$$C_n = 0 \quad \text{et} \quad C'_n = 0,$$

et ces mêmes équations deviennent

$$\frac{p}{\sqrt{1+p^2}} = A_n\lambda + \frac{B_n}{2}\lambda^2$$

et

$$y = \frac{A_n}{2}\lambda^2 + \frac{B_n}{6}\lambda^3.$$

Pour déterminer les valeurs de C_{n-1} et de C'_{n-1}, j'observe que, pour $\lambda = L_n$, les valeurs de p et de y doivent être les mêmes pour le premier et le second étages de la maîtresse feuille. On a donc

$$C_{n-1} + A_{n-1}L_n + \frac{B_{n-1}}{2}L^2_n = A_n L_n + \frac{B_n}{2}L^2_n,$$

et

$$C'_{n-1} + C_{n-1}L_n + \frac{A_{n-1}}{2}L^2_n + \frac{B_{n-1}}{6}L^3_n = \frac{A_n}{2}L^2_n + \frac{B_n}{6}L^3_n.$$

De là on tire

$$C_{n-1} = L_n(A_n - A_{n-1}) + \frac{L^2_n}{2}(B_n - B_{n-1})$$

et

$$C'_{n-1} = -\frac{L^2_n}{2}(A_n - A_{n-1}) - \frac{L^3_n}{3}(B_n - B_{n-1}).$$

On trouve absolument de même

$$C_{n-2} = L_n(A_n - A_{n-1}) + \frac{L^2_n}{2}(B_n - B_{n-1}) +$$

$$+ L_{n-1}(A_{n-1} - A_{n-2}) + \frac{L^2_{n-1}}{2}(B_{n-1} - B_{n-2}),$$

et

$$C'_{n-2} = -\frac{L^2_n}{2}(A_n - A_{n-1}) - \frac{L^3_n}{3}(B_n - B_{n-1}) -$$

$$-\frac{L^2_{n-1}}{2}(A_{n-1} - A_{n-2}) - \frac{L^3_{n-1}}{3}(B_{n-1} - B_{n-2}).$$

Il est facile de reconnaître, d'après la forme des différences successives $C_{n-2}-C_{n-1}$, $C_{n-3}-C_{n-2}$, $C_{n-4}-C_{n-3}$, etc., ainsi que des différences $C'_{n-2}-C'_{n-1}$, $C'_{n-3}-C'_{n-2}$, etc., que cette forme est celle de toutes les constantes; en sorte que l'on peut écrire d'une manière générale

$$C_{n-k}=L_n(A_n-A_{n-1})+\frac{L^2_n}{2}(B_n-B_{n-1})+$$

$$+L_{n-1}(A_{n-1}-A_{n-2})+\frac{L^2_{n-1}}{2}(B_{n-1}-B_{n-2})+$$

$$+L_{n-2}(A_{n-2}-A_{n-3})+\frac{L^2_{n-2}}{2}(B_{n-2}-B_{n-3})+\text{etc.}+$$

$$+L_{n-k+1}(A_{n-k+1}-A_{n-k})+\frac{L^2_{n-k+1}}{2}(B_{n+k+1}-B_{n-k})$$

et

$$C'_{n-k}=-\frac{L^2_n}{2}(A_n-A_{n-1})-\frac{L^3_n}{3}(B_n-B_{n-1})-$$

$$-\frac{L^2_{n-1}}{2}(A_{n-1}-A_{n-2})-\frac{L^3_{n-1}}{3}(B_{n-1}-B_{n-2})-\text{etc.}-$$

$$-\frac{L^2_{n-k+1}}{2}(A_{n-k+1}-A_{n-k})-\frac{L^3_{n-k+1}}{3}(B_{n-k+1}-B_{n-k})$$

Ces valeurs sont celles qu'il faudrait substituer à la place de C_{n-k} et de C'_{n-k}, dans les équations qui se rapportent au $(k+1)^{\text{ème}}$ étage de la maîtresse feuille à partir du centre et qui sont :

$$\frac{p}{\sqrt{1+p^2}}=C_{n-k}+A_{n-k}\lambda+\frac{B_{n-k}}{2}\lambda^2,$$

et

$$y=C'_{n-k}+C_{n-k}\lambda+\frac{A_{n-k}}{2}\lambda^2+\frac{B_{n-k}}{6}\lambda^3.$$

Ainsi pour un point quelconque, répondant à l'arc λ du $(k+1)^{\text{ème}}$ étage, on aura, sous la charge Q appliquée a chaque extrémité,

$$(I)\qquad y = \frac{L^2_n}{2} \times \frac{M_n\left[M\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{r_n}\right)+M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_n}\right)+\text{etc.}+M_{n-1}\left(\frac{1}{r_{n-1}}-\frac{1}{r_n}\right)-QL\right]}{(M+M_1+\text{etc.}+M_n)(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-1})}+$$

$$+\frac{L^3_n}{3}\times\frac{M_nQ}{(M+M_1+\text{etc.}+M_n)(+M+M_1+\text{etc.}+M_{n-1})}+$$

$$+\frac{L^2_{n-1}}{2}\times\frac{M_{n-1}\left[M\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{r_{n-1}}\right)+M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_{n-1}}\right)+\text{etc.}+M_{n-2}\left(\frac{1}{r_{n-2}}-\frac{1}{r_{n-1}}\right)-QL\right]}{(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-1})(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-2})}$$

$$+\frac{L^3_{n-1}}{3}\times\frac{M_{n-1}Q}{(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-1})(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-2})}+\text{etc.}\quad+$$

$$+\frac{L^2_{n-k+1}}{2}\times\frac{M_{n-k+1}\left[M\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{r_{n-k+1}}\right)+M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_{n-k+1}}\right)+\text{etc.}+M_{n-k}\left(\frac{1}{r_{n-k}}-\frac{1}{r_{n-k+1}}\right)-QL\right]}{(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-k+1}.(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-k})}+$$

$$+\frac{L^3_{n-k+1}}{3}\times\frac{M_{n-k+1}Q}{(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-k+1})(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-k})}+$$

$$
+\left[
\begin{aligned}
& L_n^2 \times \frac{M_n\left[QL - M\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{r_n}\right) - M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_n}\right) - \text{etc.} - M_{n-1}\left(\frac{1}{r_{n-1}}-\frac{1}{r_n}\right)\right]}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_n)(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})} - \\
& \quad - \frac{L^2_n}{2} \times \frac{M_n Q}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_n)(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})} + \\
& + L^2_{n-1} \times \frac{M_{n-1}\left[QL - M\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{r_{n-1}}\right) - M_1\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_{n-1}}\right) - \text{etc.} - M_{n-2}\left(\frac{1}{r_{n-2}}-\frac{1}{r_{n-1}}\right)\right]}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-2})} - \\
& \quad - \frac{L^2_{n-1}}{2} \times \frac{M_{n-1} Q}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-2})} + \text{etc.} + \\
& + L_{n-k+1} \times \frac{M_{n-k+1}\left[QL - M\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{r_{n-k+1}}\right) - \text{etc.} - M_{n-k}\left(\frac{1}{r_{n-k}}-\frac{1}{r_{n-k+1}}\right)\right]}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k+1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k})} - \\
& \quad - \frac{L^2_{n-k+1}}{2} \times \frac{M_{n-k+1} Q}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k+1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k})}
\end{aligned}
\right]\lambda +
$$

$$
+ \frac{\frac{M}{r} + \frac{M_1}{r_1} + \text{etc.} + \frac{M_{n-k}}{r_{n-k}} - QL}{2(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k})}\lambda^2 + \frac{Q}{6(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k})}\lambda^3.
$$

Connaissant la flèche, il est facile d'obtenir, pour un point quelconque du ressort, la flexion ou la perte de flèche qui résulte d'une charge Q appliquée à chaque extrémité. Il suffit pour cela de retrancher l'expression ci-dessus de la valeur qu'elle prend lorsqu'on y fait $Q = 0$, ce qui donne, en appelant i la flexion du point de la maîtresse feuille répondant à l'arc λ,

(II)

$$
\begin{aligned}
i = {} & \frac{L^2_n}{2} \times \frac{M_n QL}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_n)(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})} - \\
& - \frac{L^3_n}{3} \times \frac{M_n Q}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_n)(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})} + \\
& + \frac{L^2_{n-1}}{2} \times \frac{M_{n-1} QL}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-2})} - \\
& - \frac{L^3_{n-1}}{3} \times \frac{M_{n-1} Q}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-2})} + \text{etc.} + \\
& + \frac{L^2_{n-k+1}}{2} \times \frac{M_{n-k+1} QL}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k+1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k})} - \\
& - \frac{L^3_{n-k+1}}{3} \times \frac{M_{n-k+1} Q}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k+1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k})} + \\
& + \left[\begin{aligned}
& - L_n \times \frac{M_n QL}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_n)(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})} + \\
& + \frac{L^2_n}{2} \times \frac{M_n Q}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_n)(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})} - \\
& - L_{n-1} \times \frac{M_{n-1} QL}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-2})} + \\
& + \frac{L^2_{n-1}}{2} \times \frac{M_{n-1} Q}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-2})} - \text{etc.} - \\
& - L_{n-k+1} \times \frac{M_{n-k+1} QL}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k+1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k})} + \\
& + \frac{L^2_{n-k+1}}{2} \times \frac{M_{n-k+1} Q}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k+1})(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k})}
\end{aligned} \right] \lambda + \\
& + \frac{QL}{2(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k})} \lambda^2 - \frac{Q}{6(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-k})} \lambda^3.
\end{aligned}
$$

Pour avoir la flexion à l'extrémité du ressort, il suffit de faire dans la formule ci-dessus, $k = n$ et $\lambda = L$, ce qui donne, en réduisant,

$$\text{(II) bis} \quad i = \frac{QL^3}{3M} + QL_1 \frac{M_1}{(M + M_1)M} \left(LL_1 - \frac{L_1^2}{3} - L^2\right) +$$

$$+ QL_2 \frac{M_2}{(M + M_1 + M_2)(M + M_1)} \left(LL_2 - \frac{L_2^2}{3} - L^2\right) +$$

$$+ QL_3 \frac{M_3}{(M + M_1 + M_2 + M_3)(M + M_1 + M_2)} \left(LL_3 - \frac{L_3^2}{3} - L^2\right) + \text{etc.} +$$

$$+ QL_n \frac{M_n}{(M + M_1 + \text{etc.} + M_n)(M + M_1 + \text{etc.} + M_{n-1})} \left(LL_n - \frac{L_n^2}{3} - L^2\right).$$

Quand toutes les feuilles sont de même épaisseur, cette formule devient, en désignant maintenant par n, au lieu de $n + 1$, le nombre total des feuilles,

$$\text{(III)} \quad i = \frac{QL^3}{3M} + \frac{QL_1}{1.2M} \left(LL_1 - \frac{L_1^2}{3} - L^2\right) +$$

$$+ \frac{QL_2}{2.3M} \left(LL_2 - \frac{L_2^2}{3} - L^2\right) +$$

$$+ \frac{QL_3}{3.4M} \left(LL_3 - \frac{L_3^2}{3} - L^2\right) + \text{etc.} +$$

$$+ \frac{QL_{n-1}}{(n-1)nM} \left(LL_{n-1} - \frac{L_{n-1}^2}{3} - L^2\right).$$

Cette formule elle-même, dans le cas où toutes les feuilles ont la même épaisseur, peut être ramenée, comme il suit, à une forme très-simple.

En effet, soit l l'étagement; on a $L_1 = L - l$, et en remplaçant L_1 par cette valeur, on trouve aisément

$$\frac{QL_1}{1.2M} \left(LL_1 - \frac{L_1^2}{3} - L^2\right) = -\frac{Q}{3M} \frac{1}{1.2} (L^3 - l^3).$$

De même on a

$$L_2 = L - 2l,$$

et

$$\frac{QL_2}{2.3M} \left(LL_2 - \frac{L_2^2}{3} - L^2\right) = -\frac{Q}{3M} \frac{1}{2.3} (L^3 - 2^3 l^3).$$

Puis

$$\frac{QL_3}{3.4M}\left(LL_3 - \frac{L_3^2}{3} - L^2\right) = -\frac{Q}{3M}\,\frac{1}{3.4}\left(L^3 - 3^3 l^3\right)$$

et ainsi de suite; et enfin

$$\frac{QL_{n-1}}{(n-1)nM}\left(LL_{n-1} - \frac{L_{n-1}^2}{3} - L^2\right) = -$$

$$= -\frac{Q}{3M}\,\frac{1}{(n-1)n}\left[L^3 - (n-1)^3 l^3\right].$$

En substituant, on a donc

$$i = \frac{QL^3}{3M}\left[1 - \frac{1}{1.2} - \frac{1}{2.3} - \frac{1}{3.4} - \text{etc.} - \frac{1}{(n-1)n}\right] +$$

$$+ \frac{Ql^3}{3M}\left[\frac{1^2}{2} + \frac{2^2}{3} + \frac{3^2}{4} + \text{etc.} + \frac{(n-1)^2}{n}\right].$$

Or, je dis que

$$\frac{1}{1.2} + \frac{1}{2.3} + \frac{1}{3.4} + \text{etc.} + \frac{1}{(n-1)n} = \frac{n-1}{n}.$$

En effet, on voit d'abord que

$$\frac{1}{1.2} + \frac{1}{2.3} = \frac{2}{3};$$

que

$$\frac{1}{1.2} + \frac{1}{2.3} + \frac{1}{3.4} = \frac{2}{3} + \frac{1}{3.4} = \frac{3}{4};$$

que

$$\frac{1}{1.2} + \frac{1}{2.3} + \frac{1}{3.4} + \frac{1}{4.5} = \frac{3}{4} + \frac{1}{4.5} = \frac{4}{5};$$

mais je dis que cette loi est générale. En effet, supposons qu'on ait reconnu qu'elle est vraie jusqu'à l'indice k, c'est-à-dire que

$$\frac{1}{1.2} + \frac{1}{2.3} + \text{etc.} + \frac{1}{(k-1)k} = \frac{k-1}{k};$$

je dis qu'elle sera vraie pour l'indice $k+1$. En effet,

$$\frac{1}{1.2} + \frac{1}{2.3} + \text{etc.} + \frac{1}{(k-1)k} + \frac{1}{k(k+1)} = \frac{k-1}{k} +$$

$$+ \frac{1}{k(k+1)} = \frac{k^2}{k(k+1)} = \frac{k}{k+1}.$$

Donc la loi est générale, puisqu'on a reconnu directement que

$$\frac{1}{1.2}+\frac{1}{2.3}=\frac{2}{3}.$$

Donc

$$\frac{1}{1.2}+\frac{1}{2.3}+\frac{1}{3.4}+\text{etc.}+\frac{1}{(n-1)n}=\frac{n-1}{n}.$$

Donc déjà la première partie de i, c'est-à-dire

$$\frac{QL^3}{3M}\left[1-\frac{1}{1.2}-\frac{1}{2.3}-\frac{1}{3.4}-\text{etc.}-\frac{1}{(n-1)n}\right]=$$
$$=\frac{QL^3}{3M}\left(1-\frac{n-1}{n}\right)=\frac{QL^3}{3nM}.$$

Passons à la seconde partie de la valeur de i. On a

$$\frac{1^2}{2}+\frac{2^2}{3}+\frac{3^2}{4}+\text{etc.}+\frac{(n-1)^2}{n}=1\times\frac{1}{2}+2\times\frac{2}{3}+$$
$$+3\times\frac{3}{4}+\text{etc.}+(n-1)\times\frac{n-1}{n}=(2-1)\frac{1}{2}+$$
$$+(3-1)\frac{2}{3}+(4-1)\frac{3}{4}+\text{etc.}+(n-1)\frac{n-1}{n}=$$
$$=1+2+3+4+\text{etc.}+(n-1)-\frac{1}{2}-\frac{2}{3}-\frac{3}{4}-\text{etc.}-$$
$$-\frac{n-1}{n}=\frac{n(n-1)}{2}-\left(1-\frac{1}{2}\right)-\left(1-\frac{1}{3}\right)-$$
$$-\left(1-\frac{1}{4}\right)-\text{etc.}-\left(1-\frac{1}{n}\right)=\frac{n(n-1)}{2}-(n-1)+$$
$$+\frac{1}{2}+\frac{1}{3}+\frac{1}{4}+\text{etc.}+\frac{1}{n}=\frac{(n-1)(n-2)}{2}+\frac{1}{2}+\frac{1}{3}+$$
$$+\frac{1}{4}+\text{etc.}+\frac{1}{n}.$$

Donc

$$\frac{Ql^3}{3M}\left[\frac{1^2}{2}+\frac{2^2}{3}+\frac{3^2}{4}+\text{etc.}+\frac{(n-1)^2}{n}\right]=$$
$$=\frac{Ql^3}{3M}\left[\frac{(n-1)(n-2)}{2}+\frac{1}{2}+\frac{1}{3}+\text{etc.}+\frac{1}{n}\right].$$

Donc enfin on a, pour la flexion,

$$\text{(IV)}\quad i = \frac{QL^3}{3nM} + \frac{Ql^3}{3M}\left[\frac{(n-1(n-2)}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \text{etc.} + \frac{1}{n}\right].$$

Telle est la formule très-simple, pour la flexion, quand les feuilles sont toutes de même épaisseur, que le ressort du reste soit complet ou incomplet.

On peut aussi transformer d'une manière analogue la formule ordinaire de la flexion dans le cas général où les épaisseurs des feuilles sont différentes. La formule à laquelle on arrive est celle-ci, n étant le nombre total des feuilles,

$$\text{(V)}\quad i = \frac{QL^3}{3}\left[\frac{1}{M} - \frac{M_1}{(M+M_1)M} - \frac{M_2}{(M+M_1+M_2)(M+M_1)} - \text{etc.} - \frac{M_{n-1}}{(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-1})(M+M_1+\text{etc.}+M_{n-2})}\right] + \frac{Q}{3}\left[\frac{M_1}{(M+M_1)M}l^3 + \frac{M_2}{(M+M_1+M_2)(M+M_1)}(l+l_1)^3 + \text{etc.} + \frac{M_{n-1}}{(M+\text{etc.}+M_{n-1})(M+\text{etc.}+M_{n-2})}(l+l_1+\text{etc.}+l_{n-2})^3\right].$$

Pour obtenir la formule (I), j'ai supposé que a et b ne variaient pas avec λ, c'est-à-dire que l'épaisseur et le rayon de courbure de chaque feuille restaient constants dans toute son étendue. S'il n'en était pas ainsi, voici comment on opérerait pour chercher la flexion. On va voir en même temps que la flexion en un point quelconque du ressort est: 1° proportionnelle à la charge; 2° indépendante, non-seulement à la courbure initiale des lames, mais encore de leur forme primitive, que celle-ci soit un arc de cercle ou toute autre courbe.

En effet, on a toujours

$$\frac{1}{\rho} = F + Qf,$$

F étant une fonction des rayons de courbure primitifs, des moments d'élasticité, etc., mais ne dépendant pas de la charge Q

et f, une fonction dépendant de λ et des moments d'élasticité, mais ne dépendant ni de Q ni des rayons de courbure. En intégrant deux fois de suite par rapport à λ, comme variable indépendante, ainsi que cela a été fait plus haut, on aura

$$\frac{p}{\sqrt{1+p^2}} = C + \varphi(\lambda) + Q\psi(\lambda)$$

et

$$y = C' + C\lambda + \Phi(\lambda) + Q\Psi(\lambda),$$

C et C' étant deux constantes. Il est d'ailleurs évident que $\varphi(\lambda)$ et $\Phi(\lambda)$ jouissent des mêmes propriétés que F et que $\psi(\lambda)$ et $\Psi(\lambda)$ jouissent des mêmes propriétés que f, c'est-à-dire que $\varphi(\lambda)$ et $\Phi(\lambda)$ ne dépendent pas de Q, mais dépendent des rayons de courbure et des moments d'élasticité, et que $\psi(\lambda)$ et $\Psi(\lambda)$ dépendent des moments d'élasticité, mais sont indépendants de la charge et des rayons de courbure.

Je vais démontrer maintenant que les constantes C et C' et par suite les sommes $C' + C\lambda$ sont elles-mêmes de la forme $u(\lambda) + Qv(\lambda)$; la fonction $u(\lambda)$ jouissant de la propriété des fonctions F, $\varphi(\lambda)$ et $\Phi(\lambda)$, et $v(\lambda)$ de celle des fonctions f, $\psi(\lambda)$ et $\Psi(\lambda)$.

En effet, pour l'étage qui précède celui auquel se rapportent les formules ci-dessus, on aurait de même

$$\frac{p}{\sqrt{1+p^2}} = C_1 + \varphi_1(\lambda) + Q\psi_1(\lambda)$$

et

$$y = C'_1 + C_1\lambda + \Phi_1(\lambda) + Q\Psi_1(\lambda).$$

Or, si l est la demi-longueur de la feuille qui termine un des étages et qui commence l'autre, on détermine C et C' à l'aide des deux équations

$$C + \varphi(l) + Q\psi(l) = C_1 + \varphi_1(l) + Q\psi_1(l)$$

et

$$C' + Cl + \Phi(l) + Q\Psi(l) = C'_1 + C_1 l + \Phi_1(l) + Q\Psi_1(l).$$

Or on voit tout de suite que ces équations donnent

$$C = C_1 + s + Qt \quad \text{et} \quad C' = C'_1 + s' + Qt',$$

les fonctions s et s' étant de la catégorie des fonctions φ, Φ, etc., et les fonctions t et t' de celle des fonctions ψ,

Ψ, etc. On aurait des relations semblables, d'une part, entre C_1 et C_2, C_2 et C_3, etc.; et de l'autre, entre C'_1 et C'_2, C'_2 et C'_3, etc.; et comme les dernières constantes C_n et C'_n, qui se rapportent au premier étage de la maîtresse feuille, à partir du milieu du ressort, sont nulles, puisqu'au point milieu de la longueur de la maîtresse feuille on a $p = 0$ et $y = 0$, il s'ensuit que toujours C et C' et, par suite, les sommes $C' + C\lambda$ sont de la forme indiquée $u(\lambda) + Qv(\lambda)$; par conséquent, on a toujours

$$y = U(\lambda) + QV(\lambda)$$

et aussi

$$\frac{p}{\sqrt{1+p^2}} = U'(\lambda) + QV'(\lambda),$$

les fonctions U et U' appartenant à la catégorie des fonctions φ et les fonctions V et V' à celle des fonctions ψ.

Ces résultats sont, comme on le voit, indépendants de la nature de la courbe de fabrication des lames et ne supposent même pas que les moments d'élasticité restent constants dans une même feuille.

Pour avoir la flexion en un point quelconque, il faut faire dans l'expression ci-dessus, $Q = 0$, et, comme $U(\lambda)$ et $V(\lambda)$ ne dépendent pas de Q, on aura pour la valeur de y, sans charge,

$$y_0 = U(\lambda);$$

mais la flexion

$$i = y_0 - y;$$

donc

$$i = -QV(\lambda).$$

On obtient ainsi le résultat annoncé. On voit en même temps que la flexion en un point quelconque du ressort est : 1° proportionnelle à la charge; 2° indépendante de la forme et de la courbure primitives des lames, puisque $V(\lambda)$ ne dépend d'aucun rayon de courbure.

La seconde formule $\frac{p}{\sqrt{1+p^2}} = U'(\lambda) + QV'(\lambda)$ fournit un résultat analogue. En effet, en appelant θ l'angle formé par la tangente avec l'horizontale, on a

$$\frac{p}{\sqrt{1+p^2}} = \frac{dy}{d\lambda} = \sin\theta.$$

Or, si on désigne par θ_0 ce qu'est cet angle, quand il n'y a pas de charge, on voit que

$$\sin\theta_0 - \sin\theta = -QV'(\lambda).$$

Ainsi la diminution du sinus de cet angle est proportionnelle à la charge et indépendante de la forme et de la courbure initiales des lames.

Appliquons la méthode générale ci-dessus exposée à la détermination de la formule de la flexion, quand on veut tenir compte des amincissements et dans le cas où les feuilles ont toutes la même épaisseur, que le ressort du reste soit *complet* ou *incomplet*.

Sans doute la formule (IV), où il n'est pas tenu compte des amincissements, donnera très-approximativement la flexion. Cependant il peut se présenter des cas où ces amincissements ont assez d'influence sur la flexion pour qu'il soit nécessaire d'en tenir compte.

Supposons d'abord le cas le plus simple où le ressort est complet, c'est-à-dire où les étagements se prolongent jusqu'au milieu du ressort.

Soit alors une section quelconque du ressort traversant k feuilles. On aura pour cette section, en appelant m le moment d'élasticité de la section amincie de la $k^{\text{ème}}$ feuille comprise dans cette section,

$$\frac{1}{\rho} = \frac{(k-1)\frac{M}{r} + \frac{m}{r} - Q(L-\lambda)}{(k-1)M + m}.$$

Mais on a, d'après la loi des étagements,

$$(k-1)\frac{M}{r} = (k-1)Pl$$

et, d'après la loi des amincissements,

$$\frac{m}{r} = P(L_{k-1} - \lambda).$$

Donc comme $(k-1)l + L_{k-1} - \lambda = L - \lambda$, on trouve, en substituant et simplifiant,

$$\frac{1}{\rho} = \frac{P-Q}{P}\frac{1}{r}.$$

On voit déjà que, grâce aux étagements et aux amincissements, le ressort fléchit toujours en arc de cercle, quelle que soit la charge.

Ici, pour avoir la flexion, il n'est même pas besoin d'intégrer, car on a

$$i = \frac{L^2}{2r} - \frac{L^2}{2\rho} = \frac{L^2}{2r}\left(1 - \frac{P-Q}{P}\right)$$

ou

$$i = \frac{QL^2}{2Pr}.$$

Remplaçant Pr par sa valeur $\frac{M}{l}$, on trouve

$$\text{(VI)} \qquad i = \frac{QL^2 l}{2M},$$

formule très-simple qui fait connaître exactement la flexion d'un ressort *complet* en tenant compte des amincissements.

Si le dernier étagement aboutit juste au centre du ressort, alors $l = \frac{L}{n}$ et on a

$$i = \frac{QL^3}{2nM},$$

c'est-à-dire que la flexion est alors une fois et demie celle qui aurait lieu si les n feuilles avaient toutes la longueur 2L sans être amincies.

Cherchons maintenant, en tenant compte des amincissements, la formule de la flexion, quand le ressort est incomplet (*fig.* 15).

Pour la partie IK du ressort non étagée et non amincie, on a, suivant la méthode générale,

$$\frac{1}{\rho} = a + b\lambda,$$

où l'on a, comme il est facile de le voir,

$$a = \frac{P(L - L_n) - QL}{nM}$$

et

$$b = \frac{Q}{nM}.$$

D'ailleurs $L_n = IS$ est la demi-longueur de la dernière feuille diminuée de son étagement.

En intégrant deux fois de suite, on a

$$\frac{p}{\sqrt{1+p^2}} = a\lambda + \frac{b}{2}\lambda^2$$

et

$$y = \frac{a}{2}\lambda^2 + \frac{b}{6}\lambda^3.$$

Il n'y a pas de constante à ajouter, puisqu'au point milieu du ressort on a $p = 0$ et $y = 0$.

L'autre portion AI du ressort fléchira en arc de cercle et on aura pour elle

$$\frac{1}{\rho} = a',$$

en posant pour abréger

$$\frac{P - Q}{P}\frac{1}{r} = a'.$$

En intégrant deux fois de suite, d'après la méthode générale, on a pour la partie AI

$$\frac{p}{\sqrt{1+p^2}} = C + a'\lambda$$

et

$$y = C' + C\lambda + \frac{a'}{2}\lambda^2.$$

Les constantes C et C' se déterminent toujours d'après la condition que les valeurs de p et de y soient les mêmes, dans la section II', pour la partie IK et pour la partie AI du ressort. On doit donc avoir

$$C + a'L_n = aL_n + \frac{b}{2}L_n^2$$

et

$$C' + CL_n + \frac{a'}{2}L_n^2 = \frac{a}{2}L_n^2 + \frac{b}{6}L_n^3,$$

d'où l'on tire

$$C = (a - a')\,L_n + \frac{b}{2}L_n^2$$

et

$$C' = (a' - a)\frac{L^2_n}{2} - b\frac{L^3_n}{3}.$$

Substituant ces valeurs dans l'équation

$$y = C' + C\lambda + \frac{a'}{2}\lambda^2$$

et faisant $\lambda = L$ pour avoir la flexion à l'extrémité du ressort, on a pour cette extrémité

$$y = (a' - a)\frac{L^2_n}{2} - \frac{bL^3_n}{3} + L\left[(a - a')L_n + \frac{bL^2_n}{2}\right] + \frac{a'}{2}L^2.$$

Remplaçons a' par $\frac{P - Q}{Pr}$, a par sa valeur $\frac{P(L - L_n) - QL}{Mn}$ ou par $\frac{Pnl - QL}{Pnrl}$, ce qui revient au même, puisque $L_n = L - nl$ et que $M = Prl$; enfin remplaçons b par $\frac{Q}{nM}$ ou plutôt par $\frac{Q}{Pnrl}$ et remplaçons L_n par $L - nl$. Ces substitutions faites, on trouve en réduisant

$$y = \frac{Q(L - nl)^3}{6Pnrl} - \frac{QL(L - nl)^2}{2Pnrl} + \frac{(P - Q)nlL^2}{2Pnrl}.$$

Pour avoir la flexion, il suffit de retrancher cette formule de la valeur qu'elle prend lorsqu'on y fait $Q = 0$, et l'on a ainsi pour la flexion, en réduisant et remplaçant au dénominateur Prl par M,

$$\text{(VII)} \qquad i = \frac{Q}{6nM}[2L^3 + (nl)^3].$$

Cette formule très-simple servira à connaître la flexion en tenant compte des amincissements pour un ressort à feuilles de même épaisseur, que le ressort soit complet ou incomplet. Quand le ressort est complet, on peut se servir de la formule (VI). Cependant, même dans ce cas, si on s'est arrêté pour l'étagement du ressort à l'entrée de la bride, la formule (VII) sera un peu plus exacte, car alors le ressort est véritablement un ressort incomplet. Cepen-

dant, dans ce cas, la différence sera généralement insignifiante et la formule (VII) sera principalement utile dans la méthode qui a été précédemment exposée pour le calcul des ressorts à auxiliaire.

Dans le cas où les feuilles auraient toutes la même longueur, on aurait $l = 0$ et la formule (VII) donnerait

$$i = \frac{QL^3}{3nM},$$

résultat connu. Si le ressort était étagé complétement et que l'on eût $nl = L$, la formule (VII) donnerait

$$i = \frac{QL^3}{2nM},$$

comme cela a déjà été obtenu plus haut d'une autre manière.

SOUPAPES DE SÛRETÉ

AVEC LEVIER A ÉCHAPPEMENT.

Par MM. LEMONNIER ET VALLÉE,

chefs d'atelier au chemin de fer d'Orléans.

On sait combien les appareils de sûreté sont nécessaires sur les chaudières à vapeur, et cependant, malgré leur application, il arrive encore fréquemment des accidents, soit dans les mines, soit dans les navires ou sur les chemins de fer.

En étudiant ce sujet important d'une manière toute spéciale, nous avons pu remarquer qu'il existe un défaut capital dans tous les systèmes de soupapes de sûreté exécutés jusqu'à présent.

On observe en effet que ces appareils, toujours établis pour correspondre à une pression maximum qui est ordinairement celle du timbre de la chaudière, présentent l'inconvénient de n'ouvrir la soupape que graduellement lorsqu'il y a excès de pression, et par suite de ne laisser à la vapeur, le plus souvent, qu'un passage beaucoup trop restreint pour qu'elle puisse s'échapper avec abondance, et avec toute la rapidité nécessaire.

Or il est de la plus grande importance, pour que les accidents n'arrivent pas par suite d'un excès de pression, que l'ouverture de la soupape soit immédiatement portée à un degré suffisant pour que la vapeur ne

soit point étranglée et puisse sortir abondamment et sans obstacle. Tel est le problème que nous nous sommes proposé de résoudre, et que nous avons en effet résolu par un mécanisme bien simple, qui a l'avantage non-seulement de coûter peu, mais encore de s'appliquer sans difficulté aux appareils de sûreté existant, soit sur les chaudières de locomotives, soit sur les chaudières de la marine ou des usines.

Il sera bien facile de comprendre ce mécanisme et le principe sur lequel il est fondé, en jetant les yeux sur le dessin (Pl. IV) et sur la description qui suit :

La *fig.* 16 de ce dessin représente en élévation de côté, un appareil de sûreté à ressort du système employé dans les chemins de fer. La *fig.* 17 représente la coupe vue de face.

On suppose dans ces figures que la soupape de sûreté est fermée, c'est-à-dire que la tension de la vapeur dans la chaudière est inférieure à la pression maximum pour laquelle l'appareil est réglé.

La *fig.* 18 représente en coupe verticale le même appareil avec la soupape ouverte, ce qui suppose qu'il y a excès de pression dans le générateur.

Pour peu que l'on examine ces figures, on reconnaît sans peine que le mécanisme que nous avons ajouté au système ordinaire consiste simplement dans l'addition d'une sorte de règle A, terminée à sa partie inférieure par une espèce de talon à plan incliné *a*, et qui s'assemble à sa partie supérieure par une double articulation à deux brides cintrées B, B', dont l'une, B, se relie avec la tige verticale C, qui reçoit la pression du ressort à boudin D, renfermé dans la boîte E, et dont l'autre, celle supérieure B', se relie également à charnière avec la chape qui forme la tête de la vis ou tige filetée F, appliquée, comme on sait,

à l'extrémité du grand levier G, qui s'appuie sur le centre de la soupape afin de maintenir celle-ci appliquée sur son siége.

A l'extrémité de la boîte cylindrique E, qui renferme le ressort à boudin, se trouve une pièce faisant corps avec elle, et qui du côté de la règle A présente un appendice avec deux mentonnets *b* et *b'*. C'est entre ces deux mentonnets que s'ajuste et glisse la règle dans sa marche ascendante ou descendante.

On règle à l'avance la position de cette pièce sur la boîte de manière à correspondre exactement à la pression maximum à laquelle la chaudière doit marcher, de telle sorte que dans cette position la règle et, par suite, tout le mécanisme se trouvent comme l'indiquent les *fig.* 16 et 17, au moment ou la tension de la vapeur est près d'arriver au maximum fixé.

On voit alors que la tige filetée F, et, par suite, la tringle se soulevant et enlevant avec elle la règle A, le talon *a* de celle-ci abandonnera aussitôt le mentonnet *b*, et le plan incliné de ce talon venant alors rencontrer le second mentonnet *b'*, la règle se trouvera aussitôt dégagée et chassée immédiatement jusque dans la position inverse *fig.* 18, à cause de la disposition particulière de son assemblage avec les brides excentrées B et B' qui la réunissent, comme on l'a vu, d'une part, à la tête de la tringle C, et de l'autre à la chape de la vis F.

Il en résulte que le levier G occupera immédiatement une position assez élevée, et que, par suite, la soupape sera elle-même élevée d'une quantité suffisante pour le dégagement instantané de la vapeur.

Extrait de l'Avis de la Commission centrale des machines à vapeur.

Avec les ressorts à boudin généralement employés, chaque atmosphère de pression ne répond guère qu'à $0^m,01$ de course, et souvent même à $0^m,005$ ou $0^m,006$ seulement. Exceptionnellement, on en a fait au chemin du Nord qui ont jusqu'à $0^m,02$ de course.

Dans ces derniers temps, M. Polonceau a fait faire aussi des ressorts composés d'une simple lame d'acier horizontale, flexible dans le sens vertical.

D'une course aussi faible du ressort, pour chaque atmosphère de pression, et du rapport des bras de levier (ordinairement 1 à 10), il résulte cette conséquence fâcheuse que pour une augmentation de longueur du ressort répondant à un excès de pression de 1 atmosphère, la levée de la soupape n'est que d'un dixième de la course du ressort, et par conséquent, suivant les cas, de $0^m,001$ ou même cinq à six dixièmes de millimètre.

Il est bien clair que, dans ces conditions, l'ouverture offerte par les soupapes au dégagement de la vapeur n'est pas suffisante pour empêcher que la tension ne continue à monter; car, avec une levée de $0^m,001$, la surface d'écoulement n'est qu'un vingt-cinquième de celle de la soupape.

On perd donc ainsi, en très-grande partie, l'avantage qu'on devrait attendre du jeu de ces appareils de sûreté. Aussi observe-t-on continuellement sur les machines locomotives que, bien que les soupapes soient levées, le manomètre accuse des pressions qui s'élèvent jusqu'à 7 ou $8^{atm.}$ et même au delà, alors que le timbre répondant à la charge normale des soupapes n'est que de 6.

Ce fait se manifeste principalement dans les stationnements, lorsque la vapeur s'accumule dans la chaudière, et il se présente même assez souvent en marche. Aussi, en pareil cas, le mécanicien est-il réduit à fournir une autre issue à la vapeur, en ouvrant les communications qui permettent à celles-ci d'arriver dans l'eau du tender qu'elle sert alors à réchauffer.

La disposition très-simple imaginée par MM. Lemonnier et Vallée pare complétement à l'inconvénient d'une levée trop faible des soupapes, comme le prouvent les observations comparatives faites sur une machine du chemin de fer d'Orléans ; l'une des deux soupapes de cette machine était du système ordinaire, l'autre portait la modification. Quand on calait cette dernière de manière à ne mettre en jeu que la soupape ordinaire, celle-ci commençait à lever à 6 atmosphères, mais néanmoins le manomètre continuait à monter jusqu'à 7 et 8 atmosphères.

Au contraire, quand on calait la soupape ordinaire, et qu'on permettait à l'autre de fonctionner en la réglant de manière à lever à 6atm.,5 environ, elle levait effectivement, et la pression indiquée au manomètre tombait en moins d'une minute à 6 atmosphères.

Dans l'origine, MM. Lemonnier et Vallée avaient disposé leur appareil de telle sorte que le levier s'échappât au moment où la tension atteint la limite fixée effectuait son mouvement de rotation dans le plan vertical perpendiculaire à l'axe de la machine.

Il en résultait que le mécanicien, qui très-souvent juge de la tension de la vapeur en pressant avec la main l'écrou qui porte sur l'extrémité du levier de la soupape, était exposé à être heurté violemment sur le bras par le levier lorsque celui-ci devient libre.

Pour remédier à cet inconvénient, MM. Lemonnier

et Vallée placent maintenant l'appareil de telle façon que ce levier s'échappe dans le plan vertical parallèle à l'axe de la machine et de l'arrière vers l'avant ; le mécanicien se trouve ainsi à l'abri. Comme surcroît de précaution, ils ont adapté à l'extrémité du levier des soupapes un petit levier horizontal oblique par rapport au plan que parcourt le levier qui se décroche, et qui vient se présenter tout naturellement à la main du mécanicien, s'il veut juger de la tension intérieure en consultant les balances à la main.

Il est facile de reconnaître que le tube qui enveloppe le ressort doit avoir une longueur au moins égale à celui-ci augmentée de l'accroissement de sa longueur correspondant à la pression limite. Quand la balance est en place, le ressort étant bandé à cette pression, il est évident que la tige qui le relie au levier de la soupape est elle-même sortie de l'intérieur de ce tube d'une longueur égale à l'accroissement de longueur du ressort. MM. Lemonnier et Vallée ont d'ailleurs imaginé une autre disposition qui permet de réduire au besoin la longueur totale de l'appareil d'une quantité précisément égale à la longueur de cet accroissement. On emploie l'une ou l'autre disposition suivant que le dôme de la chaudière est plus ou moins élevé.

On peut graduer ces appareils de manière qu'ils fonctionnent à 1/2$^{atm.}$ au-dessus du timbre, afin qu'on puisse profiter de toute la tension de la vapeur sans que le mécanisme ne vienne à chaque instant faire tomber la pression, et l'on sait qu'il est avantageux, dans les machines locomotives surtout, de marcher à la plus haute pression possible.

L'utilité de ce mécanisme commence à être appréciée ; quatre-vingt-dix machines du chemin d'Orléans vont en être munies, et il est déjà adapté à trente d'entre elles.

Il n'augmente pas beaucoup le prix des balances, car elles reviennent à 65 francs au lieu de 50 ou 55.

MM. Lemonnier et Vallée ont étendu le même principe aux soupapes des chaudières des machines fixes; mais cette application n'a plus le même degré d'utilité. Les soupapes, dans ces chaudières, ne sont pas pressées par des ressorts faisant obstacle à ce qu'elles se lèvent, et qui résistent d'autant plus que leur soulèvement est plus considérable.

En résumé, la commission reconnaissant tout ce qu'il y a d'ingénieux dans la disposition proposée par MM. Lemonnier et Vallée, déclare qu'il est à désirer qu'une expérience plus prolongée vienne confirmer comme on a tout lieu de le croire, les avantages qui doivent en résulter.

Le secrétaire-adjoint,
E. Phillips.

L'inspecteur général des mines,
président de la commission,
L. Cordier.

RECHERCHES ANALYTIQUES

DU PLATINE DANS LES ALPES,

Par M. GUEYMARD, ingénieur en chef des mines en retraite.

Mon premier mémoire sur la découverte du platine dans les Alpes a été lu à l'Institut, le 31 décembre 1849, par M. Arago. La présence d'un métal si précieux fut accueillie avec empressement par tous les savants, et quelques-uns seulement témoignèrent de la surprise; mais il fallut bien se rendre à l'évidence des faits, lorsque M. Ebelmen déclara que cette découverte était réelle, car sur quatre gîtes que j'avais signalés, il reconnut la présence de ce métal dans trois.

La recherche du platine m'a conduit à constater la présence de l'or dans des gîtes métalliques et dans quelques roches. J'ai employé tantôt la fonte au creuset, tantôt la scorification. Les culots ont été coupellés, et les boutons de retour ont été soumis à des procédés d'analyses rigoureux.

J'ai dû recourir à la synthèse pour constater d'une manière sûre la présence de l'or et du platine, lorsque la pondération n'est pas possible. J'ai pris des chlorures d'or et de platine purs. J'ai fait les expériences suivantes :

1° Une gouttelette de chlorure d'or étendue avec peu d'eau, sur laquelle on ajoute un peu de sel d'étain en poussière, donne une couleur jaune légèrement rousâtre. Si l'on ajoute deux à trois gouttes d'acide hydrochlorique, la couleur jaune devient violette. J'ai varié

le chlorure d'or depuis la plus petite gouttelette jusqu'à plusieurs gouttes, et j'ai eu constamment la même couleur avec des variantes dans l'intensité.

2° Une gouttelette de chlorure de platine étendue avec peu d'eau, sur laquelle on ajoute un peu de sel d'étain en poussière, donne une couleur d'un jaune orangé qui devient plus vive par l'addition de quelques gouttes d'acide hydrochlorique.

3° Une gouttelette de chlorure d'or et une gouttelette de chlorure de platine mélangées, étendues avec peu d'eau, donnent, par l'addition d'une petite quantité de sel d'étain en poussière, une couleur jaune roussâtre. En ajoutant quelques gouttes d'acide hydrochlorique et laissant reposer, la liqueur devient jaune orangé, et au fond on a un dépôt violet. J'ai varié les quantités de chlorure, depuis les plus petites gouttelettes jusqu'à une ou deux gouttes, j'ai obtenu les mêmes résultats, avec de simples changements d'intensité des couleurs.

Pour l'analyse qualitative, je suis sûr de ce procédé avec l'expérience que j'ai acquise. Les boutons de retour ne pesant qu'un demi-milligramme ou un milligramme m'ont présenté les couleurs que je viens d'indiquer, et j'ai pu alors reconnaître dans tous les boutons de retour la présence du platine, ou de l'or, ou celle des deux métaux à la fois ; la description du procédé que j'ai suivi était nécessaire pour donner de la valeur aux résultats qui vont suivre.

J'ai fait l'analyse d'un grand nombre d'échantillons que j'ai pris pendant les sept voyages que j'ai faits en 1850 dans les Alpes. Les résultats qui suivent vont augmenter l'intérêt que les Alpes présentent ; leur groupement géographique facilitera d'ailleurs leur étude.

RECHERCHES ANALYTIQUES DU PLATINE DANS LES ALPES.

NATURE DES MINERAIS SOUMIS AUX ESSAIS.	Poids du minerai auquel l'essai est rapporté.	Cuivre.	Argent.	OR.	PLATINE.	OBSERVATIONS.
	gr.	gr.	millig.			
Cantonnements de Saint-Arey et de Prunières, près la Mure.						
Cuivre gris de Saint-Arey n° 1	100	11,7	240	»	»	Les essais des sept premiers échantillons de cuivre gris, antérieurs à 1847, n'ont pas été faits pour le platine.
Id. n° 2	100	6,0	120	»	»	
Id. n° 3	100	9,7	120	»	»	
Id. n° 4	100	14,0	240	»	»	
Id. n° 5	100	12,0	240	»	»	
Id. n° 6	100	»	340	»	»	
Id. n° 7	100	»	560	»	»	
Bournonite mêlée de cuivre gris des environs de la Mure	100	»	»	faibles indices.	faibles indices.	
Bournonite de Combe-Guichard, commune de Prunières	100	»	»	*id.*	indices.	
Cuivre gris trouvé dans les champs de Saint-Arey	100	6,26	»	*id.*	*id.*	
Cuivre gris des galeries Lesbros-Dufresne et Julien	100	26,4	»	*id.*	*id.*	
Cuivre gris du filon Rousset, commune de Prunières	100	11,86	»	*id.*	*id.*	
Calamine blende et cinabre de Combe-Guichard, *id.*	100	32,6	»	néant.	*id.*	
Cantonnements du Valjoufrey et de Laffrey.						
Galène et cuivre pyriteux du Valjoufrey	25	»	4	indices.	néant.	Toutes les localités de Laffrey, de la Fayolle, de Prunières et de Saint-Arey sont dans un même vallon appelé Matésyne. Les blendes et les cuivres gris contiennent en général de l'or et du platine, tandis que les galènes pures n'en renferment pas.
Cuivre gris de la Longerolle n° 1	100	»	65	*id.*	*id.*	
Id. n° 2	100	»	220	*id.*	*id.*	
Cuivre gris et blende de la Longerolle	25	»	2	faibles indices.	traces.	
Galène de la Longerolle	100	»	61	néant.	néant.	
Galène et cuivre gris de la Longerolle	100	»	57	faibles indices.	indices.	
Galène et blende de la Longerolle	25	»	6	*id.*	faibles indices.	
Blende du filon de la Longerolle	100	»	10	traces.	indices.	
Cuivre gris de Lapeyrère	100	»	70	*id.*	faibles indices.	
Blende du gîte de Lapeyrère	100	»	10	*id.*	*id.*	
Blende du grand lac de Laffrey	100	»	5	*id.*	*id.*	
Galène du filon de la Fayolle	100	»	60	néant.	néant.	
Blende du filon de la Fayolle	100	»	20	indices.	*id.*	
Pyrite de fer magnétique du filon de la Fayolle	100	»	5	traces.	*id.*	

RECHERCHES ANALYTIQUES DU PLATINE DANS LES ALPES (suite).

NATURE. DES MINERAIS SOUMIS AUX ESSAIS.	Poids du minerai auquel l'essai est rapporté.	Argent.	OR.	PLATINE.	OBSERVATIONS.
	gr.	millig.			
Cantonnements de la Motte-Saint-Martin, de Barles (Basses-Alpes) et de Champoléon (Hautes-Alpes).					
Fer spathique de la Motte Saint-Martin	25	3,0	traces.	néant.	Plusieurs autres échantillons de calcaires dolomitiques, provenant des différentes galeries de la mine du Chapeau, ont tous présenté les réactions platinifères et aurifères.
Bournonite de Barles	20	2,0	*id.*	*id.*	
Cuivre pyriteux panaché du Chapeau	38	2,5	néant.	indices.	
Cuivre pyriteux panaché du Pas-de-las-Peyre	21	2,0	*id.*	*id.*	
Variolite du Pas-de-las Peyre	10	0,25	indices.	néant.	
Calcaires dolomitiques de la vallée du Toron	20	1,0	*id.*	faibles indices.	
Baryte sulfatée (vallée du Toron), n° 1	20	6,0	*Id.*	indices.	
Id. *Id.* n° 2	20	2,0	*id.*	*id.*	
Calcaires dolomitiques du Chapeau	20	2,0	*id.*	traces.	
Cantonnements du vallon d'Avançon et du Laus (Hautes-Alpes).					
Cuivre gris de Pisse-Loup	25	11,0	indices.	néant.	Ce cantonnement renferme trois gîtes, dont deux méritent des fouilles sérieuses.
Cuivre gris de Pisse-Cervier (nord)	25	30,0	*id.*	*id.*	
Id. *Id.* (sud)	25	14,0	*id.*	*id.*	
Cuivre gris du Clos-de-l'Aigle	25	15,0	faibles indices.	faibles indices.	
Cuivre gris et cuivre carbonaté du Clos-de-l'Aigle	30	20,0	traces.	*id.*	
Cuivre gris de Pisse-Cervier	10	10,0	*id.*	*id.*	
Cuivre gris impur de Pisse-Loup	10	7,0	*id.*	*id.*	
Canton de Remolon (Hautes-Alpes).					
Cuivre gris de Remolon	10	25,0	indices,	néant.	D'autres analyses ont aussi démontré que les cuivres gris étaient seulement aurifères, tandis que les minerais de fer contenaient de l'or et du platine.
Pyrite de fer de Remolon	30	»	*id.*	indices.	
Fer spathique de Remolon	35	»	*id.*	*id.*	

Le cantonnement de Revel, au-dessus de Domène, a été étudié rapidement; des échantillons de cuivre carbonaté et de cuivre gris recueillis aux affleurements des filons ont donné des boutons d'argent aurifère avec traces de platine.

RECHERCHES ANALYTIQUES DU PLATINE DANS LES ALPES (suite).

NATURE DES MINERAIS SOUMIS AUX ESSAIS.	Poids du minerai auquel l'essai est rapporté.	Argent.	Or.	Platine.	OBSERVATIONS.
	gr.	millig.			
Mandement de la Rochette (Savoie).					
Cuivre gris à l'affleurement du filon	10	73,0	traces.	néant.	Divers échantillons du mandement de la Rochette ont encore été analysés. Ils ont tous donné, à l'exception de deux, des boutons de retour aurifères; mais on n'a pas trouvé la moindre trace de platine.
Galerie Guillet	10	39,0	*id.*	*id.*	
Gros filon	10	60,0	*id.*	*id.*	
Blende de la galerie de recherche	10	3,0	*id.*	*id.*	
Cuivre carbonaté du filon de Presles	25	19,0	*id.*	*id.*	
Pyrite de fer du puits Trébudret	10	11,0	*id.*	*id.*	
Cuivre gris de Belleville (Savoie)	10	18,0	*id.*	*id.*	
Cuivre gris de Moutan (Savoie)	10	10,0	*id.*	*id.*	
Cantonnement d'Allevard.					
Cuivre gris (minerai choisi)	100	260,0	»	traces.	
Id. mélangé de gangue	100	120,0	»	*id.*	
Fer spathique de la Chevrette	25	1,0	indices.	néant.	
Pyrites de la concession de Calvat	10	1,0	faibles indices.	*id.*	
Cantonnements de Theys, de Laferrière, de Bella-donna et de Lancey.					
Cuivre pyriteux des montagnes de Theys	10	2,0	traces.	néant.	
Pyrite de fer près de Rochefort	20	4,0	*id.*	*id.*	
Cuivre gris de Bella-Donna	25	22,0	indices.	*id.*	
Id. *Id.* au-dessus de la Combe de Lancey	10	30,0	traces.	*id.*	
Cantonnements de Vaulnaveys, de Pierre-Platte et des ruines de Léchilienne.					
Cuivre gris et cuivre carbonaté de Vaulnaveys	20	0,50	»	faibles indices.	Ces trois localités ne renferment pas de gîtes exploitables.
Cuivre gris de Pierre-Plate	20	23,0	traces.	néant.	
Id. *Id.* du filon de blende, des ruines de Léchilienne	10	7,6	faibles indices.	faibles indices.	
Id. *Id.* au-dessus des ruines de Léchilienne	10	24,0	traces.	néant.	

RECHERCHES ANALYTIQUES DU PLATINE DANS LES ALPES (suite).

NATURE DES MINERAIS SOUMIS AUX ESSAIS.	Poids du minerai auquel l'essai est rapporté.	Argent.	OR.	PLATINE.	OBSERVATIONS.
	gr.	millig.			
Cantonnements de Mens, de Roissart et de la Motte-Saint-Martin.					
Fer spathique de Mens	50	1,5	traces.	»	
Pyrite de fer de Roissat	10	0,5	*id.*	»	
Cuivre pyriteux de la Motte-Saint-Martin	15	0,5	*id.*	»	
Cantonnement de Vienne (Fonderie de Saint-Christ).					
Blende de la Poipe (travaux supérieurs)	10	3,0	faibles indices.	néant.	Des recherches ont été faites sur les résidus des cornues riches en zinc : les boutons qu'on a obtenus étaient platinifères et ne présentaient pas ou presque pas d'or.
Id. *Id.* (travaux inférieurs)	10	2,5	traces.	*id.*	
Galène à grandes facettes de la Poipe, n° 1	10	1,0	*id.*	*id.*	
Id. *Id.* n° 2	10	1,0	*id.*	*id.*	
Cantonnement des vallées de la Durance et de la Romanche.					
Schlichs des mines de plomb et de cuivre d'Oulles	20	15,0	indices.	Néant.	En résumé, des indices d'or ont été constatés dans presque toutes les substances minérales qui composent les divers gîtes des vallées de la Romanche et de la Durance, tandis que le platine n'a été reconnu que dans les calcaires non métamorphiques de la Grave, appartenant à la formation du lias.
Schlichs de la galène d'écoulement d'Oulles	20	17,0	traces.	*id.*	
Cuivre gris d'Oulles	25	13,0	*id.*	*id.*	
Cuivre pyriteux et carbonaté d'Oulles	25	5,0	*id.*	*id.*	
Cuivre pyriteux d'Oulles, en rognons	10	1,5	*id.*	*id.*	
Pyrite de fer du col d'Ornon, n° 1	30	0,5	*id.*	*id.*	
Id. n° 2	30	0,5	*id.*	*id.*	
Id. n° 3	30	0,5	*id.*	*id.*	
Id. n° 4	30	0,5	*id.*	*id.*	
Galène du filon d'or de la Gardette	13,5	50,0	*id.*	*id.*	
Cuivre gris du Rivier-d'Allemont	10	2,0	*id.*	*id.*	
Cuivre gris du Fresney	10	34,0	*id.*	*id.*	
Pyrite de fer de Besse, en Oisans	10	1,0	*id.*	*id.*	
Galène du Grand-Clos, près la Grave	10	3,0	*id.*	*id.*	
Schlich des tables à secousses	10	3,0	*id.*	*id.*	
Calcaire du lias de la Grave (Hautes-Alpes)	25	1,0	*id.*	*id.*	

RECHERCHES ANNALYTIQUES DU PLATINE DANS LES ALPES (suite).

NATURE DES MINERAIS SOUMIS AUX ESSAIS.	Poids du minerai auquel l'essai est rapporté.	Argent.	OR.	PLATINE.	OBSERVATIONS.
	gr.	millig.			
Suite du Cantonnement des vallées de la Durance et de la Romanche.					
Pyrite de fer des montagnes de la Grave	30	1,0	*id.*	*id.*	
Calcaires noirâtres des montagnes de la Grave	75	1,0	*id.*	*id.*	
Pyrite de fer dans les calcaires de la Grave, n° 1	30	0,75	*id.*	faibles traces.	
Id. *Id.* n° 2	26	2,0	*id.*	*id.*	
Calcaire schisteux de la Grave	30	0,75	*id.*	*id.*	
Cuivre gris de Villard d'Arêne (Hautes-Alpes)	10	25,0	*id.*	*id.*	
Galène et cuivre gris de l'Alpe (Hautes-Alpes)	25	4,0	*id.*	*id.*	
Schlichs des mines de plomb de l'Argentière, n° 1	10	15,0	néant.	néant.	
Id. *Id.* n° 2	10	14,0	*id.*	*id.*	
Id. *Id.* n° 3	10	13,0	*id.*	*id.*	
Id. *Id.* n° 4	10	18,0	*id.*	*id.*	
Pyrite de fer de l'Argentière	10	1:0	traces.	*id.*	
Cantonnement du plan des Cavalles, grande chaîne des Rousses, commune de Vaujany-en-Oisans.					
Cuivre carbonaté vert pistache, plan des Cavalles, n° 1	20	1,0	faibles traces.	néant.	Le plan des Cavalles paraît donc ne pas être platinifère, du moins à la surface.
Id. *Id.* n° 2	10	0,5	néant.	*id.*	
Pyrite de fer et de cuivre très-quartzeuse	20	1,0	traces.	*id.*	
Cuivre pyriteux avec pyrites de fer	15	0,5	*id.*	*id.*	
Id. *Id.* très-impur	15	0,0	néant.	faibles indices.	
Cantonnement de la Cochette, grande chaîne des Rousses, commune de Vaujany-en-Oisans.					
Cuivre gris et cuivre pyriteux; filon de la Cochette	25	15,5	traces.	néant.	Tous les échantillons de ce gîte, voisin du plan des Clavalles, n'ont donné que de l'argent et de l'or, sans les moindres traces de platine.
Cuivre gris quartzeux; filon de la Cochette	17	18,0	*id.*	*id.*	
Cuivre gris et carbonaté; filon de la Cochette	25	12,0	faibles indices.	*id.*	
Cuivre pyriteux; filon de la Cochette	18	1,0	*id.*	*id.*	
Cuivre gris et carbonaté, fer sulfuré et galène	25	14,0	indices.	*id.*	
Cuivre gris en veines dans le gneiss, près la Cochette	17	7,0	*id.*	*id.*	

DES PROGRÈS

DES MACHINES LOCOMOTIVES

ET DE LEUR INFLUENCE SUR LES CONDITIONS DE L'ÉTABLISSEMENT DES CHEMINS DE FER.

Par M. COUCHE, ingénieur des mines, professeur à l'École des mines.

Si les chemins de fer peuvent aujourd'hui opérer en grandes masses, et par suite, à bas prix, le transport des grosses marchandises, le mener de front avec un énorme mouvement de voyageurs, enlever aux routes et disputer aux canaux leur clientèle ordinaire, développer largement leur influence vivifiante et proportionner leur puissance de trafic à l'activité qu'ils tendent à imprimer à la circulation, ils le doivent aux progrès inespérés de la force des locomotives.

Mais ce progrès ne réagit pas d'une manière moins profonde, dans certains cas, sur les conditions mêmes de l'établissement des chemins de fer, que sur le développement de leur trafic : grâce à lui, ils deviennent moins onéreux dans les contrées accidentées; ils deviennent possibles dans les circonstances qui les repoussaient absolument il y a peu d'années encore, ou ne les admettaient qu'à condition de renoncer au mode de traction ordinaire. Le constructeur de machines a ainsi simplifié et étendu en même temps la tâche de l'ingénieur, et allégé les charges imposées à la fortune publique; chaque jour les exigences du tracé deviennent moins impérieuses, elles se plient aux conditions les plus difficiles, et, comme les canaux à point de partage,

les chemins de fer franchissent des obstacles qui semblaient insurmontables pour eux.

Loin de modifier cependant les idées reçues sur l'influence des rampes en général, l'expérience n'a fait que confirmer les inconvénients qu'elles entraînent, même sous une faible inclinaison, dès que leur longueur exige l'établissement d'une vitesse uniforme. Très-courtes même, elles constituent une charge réelle pour l'exploitation quand elles coïncident avec des courbes prononcées, quand une station principale est placée à leur pied, etc.; dans tous les cas enfin, elles affectent bien plus gravement le service des marchandises que celui des voyageurs. Les sacrifices faits à l'abaissement de la limite des rampes sont donc fondés dans les circonstances ordinaires, c'est-à-dire quand on peut, à ce prix, éviter des conditions spéciales pour la traction. Mais il en est tout autrement dans les cas extrêmes, où il faut, quoi qu'on fasse, accepter des inclinaisons exceptionnelles. Aujourd'hui les locomotives laissent à cet égard aux ingénieurs une grande latitude, dont ils devront souvent user largement. On a cru pendant longtemps en France que la sécurité des trains fixait un maximum très-peu élevé aux inclinaisons admissibles sur les chemins desservis par des locomotives. De nombreux exemples prouvent qu'il est facile de mettre la sécurité à peu près entièrement hors de cause : les ingénieurs ont donc aujourd'hui pour la détermination des points difficiles du tracé une grande liberté d'allures, et, en ce qui concerne la limite des rampes, la question est presque exclusivement économique.

Cette question est d'ailleurs, sous certains rapports, moins étendue, moins complexe, aujourd'hui qu'il y a quelques années. L'expérience et les progrès de l'art ont resserré le champ de la discussion en excluant, d'une

manière absolue, si ce n'est pour des applications spéciales (1), un mode de traction qu'il fallait bien d'abord accepter comme une nécessité, dont les inconvénients étaient d'ailleurs imparfaitement appréciés, la traction au moyen de machines fixes à câbles. En présence de la puissance restreinte des locomotives, de la limite inflexible que la faible largeur de la voie semblait fixer à cet égard, on renonçait nécessairement à la locomotive, dès qu'on ne pouvait éviter, sans exagérer les frais d'établissement, des rampes inaccessibles pour elle.

C'est ainsi que la construction des plans inclinés de Liége était, il y a quinze ans, non la meilleure solution, mais tout simplement la seule possible; en l'acceptant, les ingénieurs belges obéissaient à une nécessité impérieuse, et ils ont tiré d'ailleurs un excellent parti des éléments dont ils pouvaient alors disposer.

Exclusion des plans inclinés desservis par des machines fixes.

1° Traction par un câble.

Quelques années plus tard la question eût bien changé de face : non-seulement on n'aurait pas construit les plans de Liége, mais on ne se serait même pas arrêté un instant à cette idée. En laissant de côté leurs inconvénients au point de vue de l'exploitation, inconvénients sur lesquels il serait superflu d'insister aujourd'hui, les plans inclinés en présentent deux autres, toujours graves, souvent énormes; ils exagèrent et les frais de

(1) L'adoption des machines à câble a été quelquefois motivée par des considérations particulières indépendantes de la roideur des rampes : tel était le cas du chemin de Londres à Blackwall : l'emploi des machines fixes sur ce chemin n'était nécessité ni par l'inclinaison qui est très-faible (0,010), ni par l'activité du trafic, mais il l'était par l'interdiction des locomotives, prohibées par mesure de sûreté publique. Ce chemin traverse tout un quartier de Londres au niveau des combles, et on craignait les incendies. L'expérience ayant prouvé que cette crainte n'était pas fondée, la compagnie a été autorisée à remplacer par des locomotives tout l'attirail des machines fixes, des câbles et des poulies.

construction, et l'inclinaison elle-même. La nécessité des alignements droits et d'une pente uniforme, l'obligation de conduire un tracé rectiligne à travers les accidents les plus compliqués du terrain, entraînent des travaux d'art et de terrassement souvent hors de prix, et réduisent beaucoup, à moins de modifications profondes et presque toujours inadmissibles dans le tracé général, la longueur sur laquelle la pente totale peut être répartie. Avec un tracé affranchi de la condition des alignements et approprié à des locomotives même à grand empatement, comme celles à six roues couplées, la rampe de 0,0275 de Liége à Ans, déjà rigoureusement praticable aujourd'hui pour de telles machines, eût été notablement réduite.

On peut, il est vrai, maintenir l'axe du chemin plus près du sol, et répartir la pente en substituant à un plan unique plusieurs plans de directions différentes, dont les inclinaisons peuvent différer aussi, et raccordés par de courts paliers en courbes franchis par la vitesse acquise; mais cette division (quelquefois imposée d'ailleurs par l'activité du trafic, puisqu'elle permet de faire circuler en même temps un train ou une fraction de train sur chacun des plans partiels) ne pourrait être poussée un peu loin sans aggraver outre mesure les dépenses d'outillage et d'exploitation. En rachetant par deux plans seulement la différence de niveau entre la Meuse et le plateau d'Ans, M. Maus a réussi à établir, le principe une fois admis, un équilibre très-satisfaisant entre les concessions faites aux exigences respectives de la construction et de l'exploitation. On sait cependant quels travaux il a dû accumuler dans cette section de 4.000 mètres (1).

Aggravation des dépenses d'établissement, de trac-

(1) Le cube des terrassements s'est élevé à 560.000 mètres.

tion, d'entretien, perte de temps pour le fractionnement et la recomposition des trains complets, et pour la traction des fractions de trains, telles sont les conséquences inévitables des plans inclinés intercalés dans les chemins à locomotives. A l'époque où l'expérience condamnait ce mode de traction, un autre principe surgissait et semblait promettre une solution moins vicieuse. L'idée de remplacer l'action du câble par la pression effective due à la raréfaction de l'air paraît au premier abord très-peu pratique, puisqu'elle substitue au câble un tube beaucoup plus durable sans doute, mais aussi bien plus cher, et dont l'imperméabilité est difficile à concilier avec la nécessité d'une solution de continuité complète. Mais à ces inconvénients, si réels qu'ils soient, on pouvait opposer les propriétés précieuses propres au nouveau système, et surtout la liberté complète qu'il restitue au tracé, son indépendance presque absolue à l'égard des pentes et des courbes, en un mot, son aptitude à suivre les inflexions du relief du sol.

2° Système atmosphérique.

Malgré cet avantage, le système atmosphérique a complétement échoué : prôné il y a quelques années comme destiné à supplanter un jour la locomotive, il est abandonné aujourd'hui dans le pays même qui présentait, au point de vue des frais d'établissement, les conditions les plus favorables à son développement. Une seule application survit au naufrage des autres, et c'est précisément celle qui a soulevé les critiques les plus vives, qui a été condamnée comme une reproduction pure et simple de l'expérience de Dalkey, celle du chemin de Saint-Germain.

Certes, s'il y a un reproche auquel la France donne rarement prise, c'est celui d'une persévérance trop opiniâtre dans les tentatives industrielles. Si l'application de Saint-Germain subsiste seule, c'est que, seule

aussi, elle a été faite judicieusement et dans les circonstances en dehors desquelles le succès est impossible. L'effet utile des machines fixes est indépendant de l'inclinaison, tandis que le poids de la locomotive formant une fraction du poids total du train rapidement croissante avec l'inclinaison, réduit de plus en plus la portion utilisée de son travail. Une autre considération plus grave encore permet aussi de croire que la condamnation prononcée contre le système atmosphérique n'est peut-être pas sans appel; il est évidemment impraticable sur niveau, ou en général dans tous les cas où le moteur doit agir dans les deux sens : voie, tube, machines, tout devrait être double dans ce cas, quoiqu'on ait cherché à établir qu'une seule voie suffirait, même pour un trafic très-considérable : mais sur les fortes rampes, où la descente s'opère par la gravité, la voie montante devrait seule être pourvue de l'appareil pneumatique. Il y a peut-être plusieurs cas où la dépense du tube unique, et une exploitation un peu plus onéreuse, seraient compensées et au delà par l'économie de l'établissement. Si conformément au projet primitif, aux conditions même du concours financier de l'État, le système avait été appliqué sur le chemin de Saint-Germain à partir de Nanterre, c'est-à-dire sur un long palier, il est plus que probable que là, comme à Croydon, la locomotive n'aurait pas tardé à se substituer au tube pneumatique (1).

L'échec du système atmosphérique tient donc moins

(1) Dans un ouvrage tout récent que j'aurai occasion de citer plus bas, M. l'ingénieur autrichien Ghega présente cette inexécution partielle du projet primitif comme un symptôme de l'abandon total et prochain du système sur le chemin de Saint-Germain. Il est inutile d'insister sur le peu de fondement de cette déduction. Personne ne conteste aujourd'hui que le système atmosphérique ne soit inapplicable sur niveau,

peut-être aux vices inhérents à sa nature, et à des imperfections de détails, qu'à l'abus de son principe, à la confiance trop absolue de ses partisans; ils ont eu le tort d'engager la lutte avec la locomotive sur un terrain où le résultat ne pouvait être douteux. Si au lieu de poser le nouveau mode de traction en rival de la locomotive, on l'avait présenté simplement comme l'auxiliaire, le complément de celle-ci, comme pouvant la remplacer quand elle devient trop onéreuse ou impossible, peut-être le problème de l'établissement des chemins de fer dans les terrains compliqués serait-il plus complétement résolu, et le système atmosphérique moins discrédité.

Ce problème, les ingénieurs de nos grandes lignes ne l'ont rencontré jusqu'à présent qu'une seule fois d'une manière sérieuse : au passage du bassin de l'Océan dans celui de la Méditerranée, à Blaisy (chemin de fer de Lyon). Ils ont tranché la question résolument, avec un grand talent de constructeur, mais en acceptant à la fois, pour l'établissement, d'énormes dépenses, et pour l'exploitation, des conditions assez onéreuses.

Défaveur dont le matériel américain est l'objet aujourd'hui.

Les ingénieurs allemands, ayant affaire à un sol généralement bien plus accidenté que le nôtre, se sont trouvés, dès l'origine, aux prises avec toutes les difficultés de la question des rampes; la raison d'économie leur avait d'abord fait accepter, ou, pour mieux dire, imposé le matériel américain, qui permet de répartir les pentes au moyen d'inflexions brusques et multi-

et il n'y avait nullement besoin de nouvelles et dispendieuses expériences pour le démontrer. Mais les locomotives sont inadmissibles sur des inclinaisons de 40 ou 50 millièmes : cela les empêche-t-il de convenir parfaitement à la traction sur niveau ou sur de faibles rampes? Et pourquoi l'inverse n'aurait-il pas lieu pour le système atmosphérique?

pliées. Mais si ce matériel, approprié aux courbes, se prête par cela même à la réduction des inclinaisons, il est, d'un autre côté, peu propre à la traction en rampes, son principe même excluant (à moins de modifications radicales, *voir* page 384) l'adhérence complète des roues de la machine. On lui adresse d'ailleurs deux autres reproches très-graves : 1° Les essieux sont soumis, par suite de la liberté des trains et de leur état perpétuel d'oscillation, à des actions destructives très-prononcées ; leurs ruptures, si rares aujourd'hui dans les wagons ordinaires, sont au contraire très-fréquentes dans les wagons américains, et cela pour des essieux identiques et également chargés. 2° Les trains mobiles sont très-sujets à dérailler ; et ce déraillement, médiocrement grave par lui-même, peut au contraire avoir des suites désastreuses, si le train est rendu tout à fait libre par la rupture, assez ordinaire en pareil cas, de la cheville ouvrière et des chaînes de retenue ; il fait alors dérailler tous ou presque tous les wagons suivants. Ces vices du matériel américain, son infériorité manifeste relativement au matériel anglais dans les circonstances très-fréquentes où celui-ci peut être conservé sans trop de sacrifices, ont beaucoup refroidi dans ces dernières années la faveur dont le premier était l'objet en Allemagne. On commence à ne l'accepter aujourd'hui qu'à contre-cœur, et seulement quand il est impossible de se soustraire à son emploi, soit par suite des exigences du terrain, soit parce que des tronçons déjà construits ne laissent plus la liberté du choix. Ce système subit donc jusqu'à un certain point le sort des plans inclinés.

Le système atmosphérique n'a d'ailleurs nullement profité de cette dépréciation du matériel américain. Les ingénieurs allemands n'ont pas négligé d'étudier les ressources que pouvait leur offrir ce nouveau mode

d'emploi des machines fixes; ils l'ont fait sans parti pris sans doute, mais aussi sans confiance, sous l'empire des préventions que soulevait l'insuccès des tentatives faites en Angleterre, et peut-être en s'attachant plus au fait lui-même qu'à la discussion de ses causes réelles.

Quoi qu'il en soit, les plans inclinés et le système atmosphérique écartés, c'est la locomotive elle-même qu'il fallait faire pénétrer dans les régions les plus accidentées du territoire; c'est-à-dire que les ingénieurs allemands ont remis surtout aux constructeurs de machines le soin de résoudre le problème, en ajoutant au besoin des perfectionnements nouveaux à ce merveilleux moteur, si rapidement amélioré déjà sous le rapport de la puissance, de la vitesse, de la sécurité, de la consommation.

Parmi les exemples, si nombreux sur les chemins allemands, de l'application des locomotives aux tracés les plus difficiles, deux surtout méritent de fixer l'attention : l'un, qui remonte déjà à quelques années, appartient à la principale ligne bavaroise, celle de Lindau à Hof; l'autre, tout récent, et qui a eu déjà un grand retentissement, appartient auchemin de Vienne à Trieste.

Le premier, déjà fort remarquable en lui-même, a en outre le mérite d'avoir en quelque sorte préparé le second. Il constitue un des termes de cette longue série de patients travaux qui ont successivement triomphé, en Allemagne, de tous les obstacles du sol. Jusqu'en 1843, la locomotive s'arrêtait au pied des contre-forts du Hartz (chemin de Brunswick à Harzburg, Pl. VI, *fig.* 6); elle remplace alors les chevaux; en 1848, elle s'élève sur le plateau du Fichtelgebirge; en 1850, elle gravit les Alpes-Rudes (chemin wurtembergeois); en 1851, elle franchit les Alpes Noriques.

De semblables résultats ont trop de valeur pour qu'on soit indifférent, en France, aux détails qui s'y rattachent. L'examen sommaire des difficultés à vaincre, des moyens par lesquels les efforts combinés des ingénieurs et des constructeurs de machines les ont surmontées, ne peut manquer ni d'utilité ni d'intérêt. La règle de sévère économie que l'Allemagne s'est imposée, plus que tous les autres États européens, dans l'exécution de son réseau, donne d'ailleurs une importance toute particulière aux principes qu'elle a été conduite à adopter, et surtout à la préférence qu'elle accorde aujourd'hui au matériel anglais, aux sacrifices qu'elle s'impose pour le conserver.

I. CHEMIN SAXO-BAVAROIS.

Section de Neuenmarkt à Marktschorgast (1).

De Nuremberg jusqu'à Neuenmarkt, c'est-à-dire jusqu'au pied du Fichtelgebirge, montagne qui sépare les bassins du Main et de la Saale (un des affluents de l'Elbe), ce chemin ne présente, sauf des rampes très-courtes, que des inclinaisons de 0,005 au plus, et à l'exception des stations, que des courbes de 292 mètres de rayon au moins. Le service y est fait par des machines anglaises à détente variable, à pistons de 0m,305 de diamètre et 0m,508 de course, et pesant 14.700 kilogrammes. C'est seulement pour les trains de marchandises très-lourds qu'on emploie des machines de 20.000 kilogrammes.

Mais le terrain présente, à partir de Neuenmarkt

(1) J'emprunte une partie des détails descriptifs sur le passage du Fichtelgebirge, à la notice publiée par M. Preu, ingénieur de section du chemin de fer bavarois, sous le titre suivant: *Die schiefe Ebene auf der Bayrisch-Sächsischen Eisenbahn zwischen Neuenmarkt und Marktschorgast, in Oberfranken.*

jusqu'à la frontière saxonne, des difficultés telles, qu'on crut devoir s'arrêter d'abord à l'idée d'un chemin desservi par des chevaux. On ne tarda pas toutefois à reconnaître que cette solution modeste ne répondait nullement, même d'après les évaluations les plus modérées, aux exigences du trafic; d'ailleurs on n'eût pas évité, même à ce prix, des travaux très-coûteux et hors de proportion avec le résultat obtenu. On se décida donc à étudier le tracé au point de vue de l'application du matériel américain.

Parmi les diverses directions étudiées dans l'avant-projet, une seule, la vallée du Streitmühl (ou Schwarzbach), pouvait se prêter à l'établissement d'un chemin de fer. Tout le terrain occupé par cette vallée, d'une largeur très-variable, fut levé par courbes horizontales, et ce travail préliminaire abrégea et facilita singulièrement les études de détail.

Plus on avançait dans cet examen, plus les obstacles semblaient grandir : un moment même le mode de traction fut de nouveau mis en question, et on revint, en désespoir de cause, à l'idée des plans inclinés à câbles. Une circonstance particulière pouvait d'ailleurs justifier jusqu'à un certain point cette solution, quand même elle n'eût pas paru la seule possible. On avait constaté, sur les hauteurs qui dominent Rohresreuth (Pl. V, *fig.* 1), l'existence d'une source probablement assez abondante pour permettre l'établissement d'une balance d'eau, combinaison déjà proposée par l'ingénieur Robinson pour le chemin de Pottville à Danville (États-Unis); mais ce projet fut bientôt abandonné à son tour. Indépendamment des inconvénients inséparables de la remorque des trains au moyen d'un câble, des doutes s'élevaient sur la constance du débit de la source qui devait alimenter la balance.

Ramenés de nouveau en présence de la locomotive comme seule solution acceptable, déterminés d'ailleurs par une longue expérience du système américain et de ses inconvénients à n'imposer au matériel aucune concession de ce genre, les ingénieurs bavarois ont déduit de la discussion des exemples connus, les limites d'inclinaison et de courbure compatibles avec ces conditions, et dirigé leur tracé en conséquence.

Tracé. La station de Neuenmarkt (*fig.* 1 et 2) est située sur un palier de 3.304 mètres, et à $352^m,24$ au-dessus du niveau de la Méditerranée. Le chemin présente, à partir de ce point, des rampes de

1° Pentes. 0,014, 0,025, 0,0246 et 0,025,

sur des longueurs respectives de

1.664^m, 2.498^m, 1.780^m et 1.129^m,

et atteint le palier de la station de Marktschorgast à la cote de 510 mètres. Une hauteur de $157^m,76$ est donc rachetée sur un développement de 7.071 mètres (inclinaison moyenne, 0,0223).

2° Courbes. Les rayons de courbure varient entre 1.168 mètres et 292 mètres; cette dernière limite n'est atteinte qu'une seule fois, à l'entrée de la station de Marktschorgast, et sur 194 mètres de longueur; en rampe, le rayon minimum est de 438 mètres.

Ces dernières conditions sont étroites sans doute pour des machines à châssis fixe et à six roues couplées : elles n'ont cependant rien d'excessif. On a souvent exagéré l'influence désastreuse des courbes et du parallélisme des essieux : l'accroissement de l'empatement des machines est même, dans certaines limites, favorable à la conservation de la voie et de la machine elle-même, quand il est la conséquence de la position de l'essieu d'arrière au delà de la boîte à feu. La voie d'une part,

le bâtis et les supports de la machine de l'autre, souffrent moins en définitive d'un léger surcroît de contrainte dans les courbes, que du défaut de stabilité dû au porte-à-faux de la boîte à feu, et des mouvements oscillatoires qui en résultent.

Quant au profil, ce n'est pas par l'inclinaison, si inusitée qu'elle soit, c'est par la longueur jusque-là sans exemple de la rampe qu'il est surtout remarquable. Des rampes de 0,025 et au delà étaient, depuis plusieurs années déjà, desservies par des locomotives, mais leur longueur ne dépassait pas 3 kilomètres, 3 1/2 au plus. Sur une rampe deux fois plus longue, les conditions pouvaient être gravement modifiées. Suffirait-il encore d'aborder le pied de la rampe avec une machine bien préparée, la chaudière bien en vapeur, le foyer bien rempli, le niveau d'eau très-élevé? Réussirait-on constamment à maintenir sur une pareille étendue la pression au degré nécessaire, à se mettre en garde contre les chances de ralentissement et d'arrêt, devenues bien plus graves en raison du développement de la rampe? La régularité du service serait-elle assurée en dépit de l'état des rails, de la direction et de l'intensité du vent? Un succès accidentel, un succès d'expérience n'était pas douteux, mais il y avait une véritable hardiesse à compter sur le succès de tous les jours.

Inclinaisons admises : 1° En Angleterre et en Amérique.

On s'est tellement laissé dominer en France, par cette idée que les fortes rampes doivent être presque à tout prix exclues des chemins de fer, qu'il n'est peut-être pas inutile de rappeler dans quelles larges limites les ingénieurs étrangers ne craignent pas de les admettre. Les exemples empruntés à l'Amérique ont peu d'autorité chez nous : on s'est habitué à considérer les principes admis dans ce pays pour l'établissement des chemins de fer, comme des exceptions inadmissibles

en France : cela est vrai en thèse générale. Mais l'Angleterre elle-même, qu'on n'accusera pas de reculer devant les grands travaux de construction, est entrée presque aussi largement que l'Amérique dans la voie des fortes rampes; elle a même, pour l'inclinaison, dépassé l'Allemagne. Ainsi, tandis que dans ce pays on s'arrête encore à 0,025, l'inclinaison s'élève à

0,027 sur le chemin de Birmingham à Gloucester (rampe de Lickey) (longueur, 3.440 mètres),
et à 0,285, 0,030 et même 0,040 sur un des chemins aboutissant au port de Hartlepool.

Parmi les exemples de rampes plus faibles, il suffira de citer celle de 0,024 sur 2.400 mètres de longueur, du chemin d'Édimbourg à Glascow; celle de 0,020, du chemin de Manchester à Leeds, etc.

En Amérique on trouve des rampes de

0,0269 sur le chemin d'Hazleton à Lehigh (Pensylvanie) (3.220^{m}),
0,0484 sur le chemin de Vicksburg à Jackson (Mississipi),
0,067 sur le chemin de Philadelphie à Colombia (855 mètres).

Toutes ces rampes sont franchies aujourd'hui par des locomotives; leur mise en activité sur la grande rampe du chemin de Birmingham à Gloucester date même de 1842. Sur la ligne de Hartlepool, de légers trains de voyageurs sont remorqués par des machines à roues couplées de 1^{m},37.

Des locomotives de Baldwin traînent quatre-vingts ou cent voyageurs sur la rampe de 0,0484 du chemin de Vicksburg à Jackson.

Une petite machine américaine de Norris, pesant garnie 10^{t},3, a remorqué sur la rampe de 0,067, 16^{t},85 en trois minutes; *elle démarrait au pied de la rampe.* La charge des roues motivées étant de 7 tonnes seulement, le coefficient de l'adhérence s'est élevé, dans

cette expérience, à $\frac{1}{3,6}$ au moins, valeur qui suppose nécessairement des circonstances atmosphériques très-favorables, et peut-être aussi l'usage continuel des boîtes à sable.

Il n'y a en France qu'une seule rampe comparable aux précédentes : celle de 0,029 du chemin de la Loire, desservie depuis 1846 par des locomotives. 2° En France.

Pendant la fête des Loges, qui attire une grande affluence à Saint-Germain, un service supplémentaire est fait sur la voie auxiliaire du chemin atmosphérique par les machines *l'Hercule* et *l'Antée*, dont les dimensions sont bien connues ; la seconde remorque, sur la rampe de 0^m,025 en moyenne (Pl. VI, *fig.* 7), quatorze wagons pleins, et elle pourrait faire plus.

On a souvent cité les expériences faites en 1846 avec *l'Hercule* sur la rampe de 0,035 et longue de 1.000 mètres qui termine l'embranchement atmosphérique. Ces résultats étaient remarquables en effet ; mais si l'inclinaison était très-forte, la rampe était courte, le rayon de courbure assez grand (400 mètres), et le temps choisi à dessein. Des expériences analogues avaient eu lieu, du reste, bien avant cette époque. Dès 1841, des locomotives légères avaient remorqué des charges proportionnées à leur puissance restreinte sur le plan incliné de Erkrath à Hochdal (chemin de Dusseldorf à Elberfeld, Pl. VI, *fig.* 8) qui a une pente de 0,0333 sur une longueur considérable, 2.450 mètres.

L'exemple du chemin de Birmingham à Gloucester a, plus que tout autre, contribué à fixer les incertitudes des ingénieurs du chemin saxo-bavarois, à leur inspirer, malgré les conditions nouvelles qu'ils s'imposaient pour la traversée du Fichtelgebirge, une confiance entière dans le succès. Cette confiance n'a pas

été trompée. Le service s'opère, sur la rampe de Neuenmarkt, avec la même facilité, la même régularité que sur le reste du chemin ; elle est franchie, à la remonte, à la vitesse de 18 kil., et un peu plus rapidement à la descente. Jusqu'au pied de la rampe, la traction est faite, pour les voyageurs, par des machines à roues indépendantes, et pour les marchandises, par des machines mixtes. De Neuenmarkt à Hof, les trains de voyageurs sont remorqués par des machines mixtes, et ceux de marchandises par des machines à six roues couplées, affectées exclusivement au service de cette section, et attelées au besoin comme renfort aux trains de voyageurs.

Machines employées sur la rampe de Neuenmarkt.

Les machines mixtes ont des pistons de $0^m,356$ et $0^m,61$ de course, des roues de $1^m,37$, et pèsent 20 tonnes.

Les machines à six roues couplées ont des pistons de $0^m,406$ et $0^m,61$ de course, des roues de $1^m,07$, une surface de chauffe de $73^{m^2},32$, et pèsent 24 tonnes. Elles portent sur le corps cylindrique un réservoir de $1^{m^3},350$ communiquant avec celui du tender, et qu'on remplit d'eau quand l'état des rails ou le poids du train exigent un surcroît de *poids adhérent*. Ces machines, parfaitement appropriées aux conditions de leur service, sortent des ateliers de Maffeï, de Munich, qui préludait ainsi au succès qu'il vient d'obtenir au Semmering.

Dans les expériences faites en octobre 1848,

Une machine mixte a remorqué une charge de 70 tonnes (tender compris) à la vitesse moyenne de $14^k,10$. Dépense d'eau pour le parcours total de 7.071 mètres rachetant $157^m,76$, $1^{m^3},86$;

Une machine à six roues couplées a remorqué 120 tonnes à la vitesse de $14^k,7$ et dépensé $2^{m^3},10$ d'eau ;

Les deux machines réunies ont remorqué : 105 tonnes à la vitesse de $27^k,83$ et 200 tonnes à la vitesse de 12 kilomètres, en consommant en moyenne, l'une $1^{m^3},73$ et l'autre $2^{m^3},20$.

Aujourd'hui, en service régulier,

Deux de ces machines remorquent 145 tonnes à la vitesse de $17^k,8$ ou 170 à la vitesse de $14^k,8$.

La construction de ces machines ne présente aucune particularité. L'emploi de la tourbe, appliquée seulement d'ailleurs aux machines mixtes, n'entraîne pas d'autres dispositions spéciales que celles qui résultent immédiatement de la faible densité du combustible, c'est-à-dire l'addition d'un wagon d'approvisionnement supplémentaire, la présence d'un chargeur sur ce wagon, et l'emploi d'une grande pelle, montée sur un petit chariot que se renvoient le chauffeur et son aide, et qui permet d'introduire à la fois des charges volumineuses dans le foyer.

Freins.

La sécurité du service sur une telle rampe exige impérieusement, tant à la remonte qu'à la descente, des moyens d'arrêt d'une grande puissance et d'un effet assuré. Il n'y a pas, du reste, de freins spéciaux : on a conservé simplement le système bien connu, en usage depuis plusieurs années sur les chemins bavarois, et qui permet à un conducteur d'enrayer à la fois plusieurs wagons; de plus, le temps qu'exige le *calage* étant augmenté en raison de la charge totale des roues sur lesquels un seul homme doit agir, et de la flexibilité des leviers dont le grand bras a une longueur égale à la hauteur des wagons, les freins peuvent être au besoin mis en jeu beaucoup plus promptement par le simple déclanchement d'un poids (1). Tous les wagons sont munis d'un frein, et les trains ordinaires sont divisés en deux groupes, dont chacun est confié à un garde-frein.

On ne peut reprocher à ce système que la complication qu'entraînent les cordons de transmission d'un wagon à l'autre et les poulies de renvoi, l'assujettissement

(1) *Voir* la description de ce frein dans l'*Eisenbahn Zeitung*, n° 4 de 1848.



qu'il impose pour la formation et la décomposition des trains. Le caractère allemand, les habitudes d'exactitude et de ponctualité qu'on rencontre généralement chez les agents inférieurs, et l'activité modérée du trafic atténuent cet inconvénient, qui rendrait une telle disposition à peu près inadmissible en Angleterre et en France. Quant à l'efficacité de l'appareil en lui-même, elle a été mise hors de doute, indépendamment des expériences spéciales, par un fait postérieur de quelques semaines seulement à l'organisation du service sur la rampe. Un train de voyageurs était sur le point d'atteindre le palier de Marktschorgast, quand l'attelage du tender et du wagon à bagages se rompit; le train, qui commença aussitôt à rétrograder avec une accélération rapide, fut bientôt arrêté.

Travaux d'art. L'établissement du chemin entre Neuenmarkt et Marktschorgast a exigé des travaux également remarquables par leur importance, par quelques particularités de construction, et par leur caractère parfaitement en harmonie avec la nature sévère et grandiose de cette contrée.

De Neuenmarkt jusqu'au pied de la montagne, c'est-à-dire sur une longueur de $1^k,66$, le tracé suit à très-peu près la pente du sol (*voir* le profil en long, *fig.* 2); il entre en tranchée à 2 kilomètres au delà, seulement sur 290 mètres de longueur et $8^m,80$ de profondeur, mais dans un terrain de grauwacke et de schiste argileux très-dur qui a exigé l'emploi presque continuel de la poudre. Le chemin se maintient à mi-côte entre les kilomètres 4 et 5, sauf la traversée de trois ravins très-profonds, R, R', R'' (*fig.* 1 et 2), sur lesquels nous reviendrons tout à l'heure; puis il entre en tranchée d'une faible longueur (292 mètres), mais sur

$27^m,70$, $12^m,30$ et $16^m,60$ de profondeur maximum, mesurée respectivement à partir des arêtes des talus et sur l'axe du chemin. L'ouverture de cette tranchée, à travers un terrain de grauwacke et de schistes amphiboliques, a entraîné de très-grandes dépenses de main-d'œuvre et de poudre. A partir de là jusqu'au palier de Marktschorgast, c'est-à-dire sur une longueur de 2 kil. à peu près, les tranchées et les remblais se succèdent à des intervalles très-rapprochés; mais cependant, à cause des profondes coupures et des pentes abruptes du terrain, les hauteurs de déblai et de remblai mesurées sur l'axe atteignent encore respectivement 7,7 et 16 mètres.

Mode de construction des remblais.

La grande disproportion qui existe entre les cubes de déblai et de remblai, et la nécessité de réduire celui-ci au minimum (les emprunts exigeant l'ouverture de véritables carrières d'une exploitation dispendieuse), ont conduit à adopter un mode particulier pour la formation de remblais. Ce sont des ouvrages mixtes, participant à la fois des remblais proprement dits et des viaducs. Ils se composent (Pl. V, *fig.* 3) d'un noyau formé des déblais meubles et en petits fragments, flanqué de deux murs en pierre sèche construits avec les fragments plus volumineux provenant aussi des tranchées, et maintenus eux-mêmes par deux murs de soutènement maçonnés en gros blocs de schiste micacé provenant de deux grandes carrières situées près de Marktschorgast. Tout ce massif est profondément enraciné dans le sol, et repose sur le roc vif taillé en gradins. Les talus ne sont pas plans; les parements des murs de soutènement sont des surfaces cylindriques; la coupe verticale du parement extérieur est un arc de cercle de 41 mètres de rayon, dont le centre est à $9^m,64$ au-dessus de la crête du remblai. L'inclinaison du talus sur la verticale est de 14°.30'

Profil en travers des remblais.

au sommet, et atteint 45° à 18^{m},40 au-dessous du niveau des rails; à partir de cette limite, quand la hauteur du remblai la dépasse, la tangente en ce point est substituée au prolongement de l'arc, pour éviter un empatement exagéré. Il va sans dire que cette disposition a été adoptée pour les parties à mi-côte comme pour les remblais complets.

Avantages de ce profil.

Vers la partie supérieure, ce profil se rapproche de la logarithmique qui conduit, pour toutes les sections horizontales, à l'égalité de charge par unité de surface. Il s'écarte peu aussi de la figure d'équilibre, pour le *glissement*, d'un massif homogène et doué de cohésion. Avec les talus plans, la stabilité d'un semblable massif décroît du haut vers le bas : pour qu'elle soit suffisante à la base, il faut qu'elle présente un excès de plus en plus grand vers le sommet.

La stabilité générale est donc, toujours en admettant l'assimilation à un massif homogène, sensiblement la même qu'avec des talus rectilignes ayant pour inclinaison celle de l'élément inférieur de l'arc; et la masse des ouvrages, ainsi que la largeur de terrain qu'ils occupent, sont notablement réduites. Pour une hauteur de 18^{m},40, par exemple, la largeur de l'emprise et la section du massif sont inférieures respectivement de 16 mètres et de 185$^{m^2}$,36 à celles qu'exigerait un simple remblai avec talus plans à 45°; et la largeur en couronne étant de 9^{m},60, la largeur à la base et la masse de l'ouvrage sont réduites l'une de 35, l'autre de 36 p. 100.

Indépendamment de toute appréciation théorique, de toute hypothèse sur la forme des surfaces de rupture virtuelle, ce profil est justifié, au moins dans sa disposition générale, par l'observation même des phénomènes que présentent souvent les remblais à talus plans et revêtus. Ces talus deviennent convexes, se roidissent beaucoup à la base, et cet accroissement d'in-

clinaison, joint à la dislocation des matériaux du revêtement, compromet la stabilité de toute la masse.

Un profil concave, avec une flèche notable et un élément supérieur très-peu incliné sur la verticale, ne peut d'ailleurs s'appliquer qu'à des talus revêtus, ou tout au moins consolidés par des moyens artificiels : il suppose l'existence de la cohésion, qui est presque nulle dans les remblais récents ; et, fût-elle rétablie, elle ne résisterait pas longtemps à l'action de la pluie, des gelées, etc., action dont le profil théorique ne tient pas compte, et qui, sans altérer la figure d'équilibre, entraînerait l'éboulement graduel des talus (1). Une grande cohésion superficielle est du reste souvent indispensable, même pour des talus plans et beaucoup moins roides que le talus naturel ; de sorte qu'une forme voisine de la figure d'équilibre pourrait sans doute être appliquée assez fréquemment, sans aggraver beaucoup les dépenses de consolidation ou d'assèchement, et dès lors avec une économie très-notable.

L'épaisseur de maçonnerie, tant en pierre sèche qu'en pierre de taille, est au sommet de 2 mètres sur chaque flanc ; elle augmente graduellement avec la profondeur. Les joints sont normaux aux parements. Ces murs sont couronnés par de gros blocs de grès formant un parapet très-massif de $0^{m},51$ de haut et $1^{m},75$ d'épaisseur. De nombreuses gargouilles débouchant sur les flancs assurent l'assèchement du noyau central.

Le cube total s'élève à 49.250 mètres pour la maçonnerie en pierre sèche, et 40.390 mètres pour la maçonnerie de mortier ; soit en tout 89.640 mètres pour les $7^{k},071$, ou en moyenne $12^{m3},6$ par mètre courant.

---

(1) On sait que l'effet des dégradations de surface est précisément de mettre peu à peu en évidence la figure d'équilibre dans les remblais à talus rectilignes : ce phénomène a été observé depuis longtemps dans plusieurs tranchées.

Le plus remarquable des ouvrages de ce genre est celui qui a été exécuté pour le passage du *Schützengraben*, que le chemin de fer traverse à une hauteur de 32 mètres (R, *fig.* 1 et 2). L'épaisseur des murs, à la base, atteint 12 mètres, et celle de tout le massif, mesurée horizontalement, 52 mètres.

Effets de la *mise en charge* des grands remblais sur les ouvrages d'art.

Un passage voûté a dû être ménagé dans ce massif, pour recevoir le lit du torrent et un chemin d'exploitation des forêts voisines. Le berceau, horizontal et en plein cintre, a 7 mètres d'ouverture, $32^m,70$ de long et $9^m,60$ de hauteur maximum sous clé. La voûte, construite en grès, a $1^m,02$ d'épaisseur. Les culées, de $3^m,20$ d'épaisseur, contre-butées par de gros murs en pierre sèche et par la masse du remblai, sont fondées sur le roc taillé en banquettes à une profondeur de $5^m,25$ à $9^m,60$ au-dessous du sol (*fig.* 4, 5, 6).

Je cite cet ouvrage à cause des accidents qu'il a éprouvés et des craintes qu'il a fait naître, malgré les garanties de solidité absolue que semblaient présenter la faible ouverture de la voûte, sa flèche, son épaisseur et celle des culées, et la nature des matériaux.

La hauteur de la charge au-dessus de la clé s'élève à $21^m,60$; elle n'atteignait encore que $17^m,50$ quand on remarqua plusieurs indices d'écrasement dans les parements des culées et vers les reins de la voûte ; on attribua d'abord ces épaufrures à une simple imperfection de la taille de quelques pierres. On suspendit les travaux ; des joints ne tardèrent pas à s'ouvrir à l'intrados vers la clé de la voûte, et des petits coins en fer, introduits dans ces fissures, tombèrent bientôt ; les éclats se multiplièrent dans les culées ; leur immobilité étant absolue, il fallut se rendre à l'évidence et reconnaître que les matériaux avaient été soumis à une charge excessive. En effet, en sondant le massif des culées, on trouva plusieurs pierres entièrement écrasées.

Ces faits étaient observés en octobre 1847. A la fin de l'hiver, on acquit la certitude que la marche des dégradations avait cessé; le dégel n'amena d'autres résultats que la chute des éclats détachés antérieurement : l'effet était produit.

La pression à laquelle les matériaux sont soumis dans une voûte avec très-grande surcharge, échappe à toute évaluation, même approximative. L'assimilation du remblai à un liquide de même densité conduirait, généralement, à une exagération d'épaisseur inadmissible. On n'a dès lors d'autre guide que l'exemple des constructions existantes; encore l'influence de la nature du remblai, de la forme et du volume moyen de ses éléments est-elle fort difficile à apprécier. On doit admettre qu'une portion du remblai pèse de tout son poids sur sa projection horizontale, si sa base est complétement inflexible, ou si elle fléchit uniformément; mais si elle est inégalement compressible, le phénomène désigné sous le nom *d'arc-boutement* (et dont les observations faites sur le sable ont donné une idée encore vague et incomplète) intervient, et change le mode de répartition des pressions qui tendent à se distribuer sur les divers points de la base, à peu près proportionnellement à leur résistance à la compression. En se dérobant sous la charge, les parties les plus compressibles la reportent, jusqu'à un certain point, sur les éléments plus résistants, au moins tant que ceux-ci ne sont pas répartis à des distances trop grandes relativement à la hauteur du massif; et le rétablissement graduel de la cohésion dans celui-ci tend ensuite à rendre cette répartition définitive, à moins que les points surchargés ne cèdent à leur tour.

Cet excès de charge, temporaire ou permanent, qui n'existe pas pour les liquides, peut quelquefois sans doute compenser, et peut-être même au delà, l'exagé-

Cause probable de l'écrasement de la voûte.

ration de la pression normale aux joints et par suite de l'épaisseur, à laquelle on serait conduit le plus souvent en négligeant la cohésion et le frottement des remblais. C'est probablement ce qui a eu lieu dans le cas dont il s'agit ; un système aussi rigide que la voûte supportée par des culées dont le renversement était absolument impossible, ne pouvait fléchir, même très-légèrement, que par suite de l'écrasement des matériaux en quelques points. On conçoit donc que cette inflexibilité initiale ait eu pour effet de reporter partiellement sur la voûte le poids des portions adjacentes du remblai. En considérant, en effet, la partie supérieure de celui-ci comme un massif distinct reposant sur le plan horizontal passant par les naissances de la voûte, sa base était incompressible au droit de la voûte, et très-compressible de part et d'autre. Le tassement de la partie inférieure, de chaque côté de la voûte, devait donc imposer à celle-ci une surcharge très-considérable (1), et c'est très-probablement à cette cause plutôt qu'à quelques mal-façons (2) qu'on doit attribuer l'écrasement observé. Mais cet écrasement, *et l'affaissement*

(1) En admettant la compensation indiquée tout à l'heure, évaluant à 2,200 kilogrammes la pesanteur spécifique de la charge, et considérant les joints de la clef comme des joints de rupture, on trouve pour la pression maximum dans le bandeau de $1^{m},02$ d'épaisseur, $32^{k},62$ par centimètre quarré. Le grès provenait des carrières des environs d'Himmelcrom, connues pour fournir des matériaux de très-bonne qualité ; quoiqu'on n'eût pas laissé au grès le temps de *s'essuyer*, il est à peu près certain qu'il était en réalité soumis à une charge maximum beaucoup plus considérable, à l'instant où les joints ont commencé à s'ouvrir d'nn côté, et à s'écraser de l'autre.

(2) Le passage voûté était surmonté de trois étages de voûtes en décharge *v*, *v*, *v* (*fig.* 4, 5 et 6) dont les culées étaient, comme les murs extérieurs, en moellons bruts de schiste micacé. L'écrasement des joints mal dégauchis des culées avait entraîné l'affaissement de ces *décharges*, qui avaient ainsi complétement manqué leur but. D'un autre côté, on

qui en était la conséquence, mettaient en jeu l'arc-boutement; la pression à laquelle la voûte était soumise se trouvait par cela même notablement réduite, et sa stabilité assurée dès lors, selon toute apparence, d'une manière indéfinie.

Réduction de la pression, due au léger affaissement de la voûte.

La plupart des remblais se constituent plus ou moins rapidement suivant leur nature, soit par suite du rétablissement de la cohésion, soit par suite de l'enchevêtrement de leurs éléments et du frottement, dans un état tel que des passages de faible ouverture peuvent s'y maintenir sans être revêtus. De semblables remblais ne doivent donc, une fois le travail du tassement accompli et l'équilibre établi, exercer sur les voûtes qu'une pression très-limitée, quelle que soit leur hauteur : et il semble qu'on peut se préoccuper modérément des effets du tassement, malgré leur apparence inquiétante. Cependant tout ce qui tient au mode d'établissement des pressions dans une telle masse est si peu connu, qu'on conçoit qu'une reprise en sous-œuvre ait paru nécessaire aux ingénieurs bavarois. Les conditions d'établissement des voûtes avec grande surcharge ne peuvent et ne pourront sans doute de longtemps être soumises à une discussion précise (1).

---

avait appliqué aux culées de la voûte principale un mode de construction très-convenable pour des murs de soutenement, mais très-vicieux pour des pieds-droits : les parements vus étaient en pierre de taille (grès) appareillée avec beaucoup de soin, tandis que le massif formé de petits moellons bruts à larges joints, avait éprouvé un tassement beaucoup plus grand et laissé la charge peser presque uniquement sur le parement; celui-ci avait cédé d'abord, et reporté ainsi graduellement la charge sur le massif, qui s'était écrasé à son tour.

(1) Le travail de reprise en sous-œuvre comprend onze arceaux (*b*, *b*, *b*..., *fig.* 4, 5, 6) en pierre de taille (granite) de 1^m,46 de largeur suivant l'axe et 1^m,02 d'épaisseur, supportés par des pieds-droits enracinés dans les culées et ayant un fruit de 1/10. Les intervalles de ces contre-forts sont garnis de moellons de

Voie. Les rails sont symétriques, et pèsent seulement 24k,74 par mètre courant ; ils sont posés jusqu'au pied de la rampe de 0,014, sur des dés en grès ayant 0m,64 de côté et 0m,32 d'épaisseur. Les rails, longs de 5m,11, s'assemblent à mi-fer sur 0m,05, de sorte que leur longueur en place est réduite à 5m,06. Elle est divisée en six portées : les deux extrêmes ont 0m,762 et les quatre intermédiaires 0m,885. Les coussinets intermédiaires pèsent 8k,19, et ceux de joint 11k,54. Le même rail a été employé sur la rampe : il était dès lors nécesssaire de lui donner une assiette plus solide, à cause du poids plus considérable des machines, de l'intensité bien plus grande de l'effort de traction, pour la voie montante, et surtout de l'action continuelle des freins, pour la voie descendante. Les dés ont été remplacés par des traverses en chêne, et le nombre des points d'appui a été augmenté d'un. La longueur des portées est :

---

grès piqué. Ceux des arceaux sont maçonnés en briques, et en retraite de 0m,15. Les voussoirs de granite forment parpaing dans les arceaux, à l'exception des clés, qui sont composées de deux blocs à cause de la nécessité de les poser latéralement et de la difficulté que cette opération eût présentée avec des blocs volumineux ; c'est du reste cette difficulté de la pose qui a fait donner la préférence à une série de chaînes sur un revêtement continu. Tout le système a été, en outre, relié par des armatures métalliques. Une demi-couronnne formée de onze segments en fonte est appliquée sur chacune des têtes, et les segments opposés sont reliés entre eux par deux systèmes de tirants en fer formés chacun de trois tronçons réunis par des emmanchements à vis. Ce travail de consolidation a présenté des difficultés réelles ; les fondations du revêtement granitique ont été poussées à une profondeur variable de 3 à 10 mètres ; mais les opérations les plus pénibles ont été le levage et la pose des gros voussoirs dans cet étroit espace.

Les deux autres viaducs R', R" (*fig.* 1 et 2), dans lesquels s'étaient manifestés des symptômes analogues, ont été l'objet d'une reprise en sous-œuvre entièrement semblable.

$0^{m},539$ pour les deux extrêmes,
$0^{m},700$ pour les deux pénultièmes,
$0^{m},861$ pour les trois intermédiaires.

II. CHEMIN DE VIENNE A TRIESTE.

Passage du Semmering.

Le chemin de Vienne à Trieste n'est pas seulement une ligne du premier ordre au point de vue des intérêts autrichiens; c'est aussi une des artères principales du réseau allemand. Trieste, l'entrepôt du commerce germanique avec le Levant (1); Trieste, cette Marseille de l'Allemagne, sera très-probablement rattachée, avant sa riche rivale, au système du réseau continental; et cependant de ces deux lignes réclamées l'une et l'autre par les intérêts nationaux de l'ordre le plus élevé, la première rencontre sur son passage deux chaînes de montagnes; la seconde suit une des plus riches vallées de l'Europe. Le gouvernement autrichien n'a pourtant rien précipité; il n'a pas fait le moindre sacrifice à l'empressement de jouir: les études n'ont pas duré moins de cinq ans. Jamais question ne mérita, en effet, un examen plus approfondi. L'importance capitale de la ligne, le trafic qui lui est réservé et les difficultés jusque-là sans exemple du terrain, faisaient de la détermination du tracé un des problèmes les plus épineux qui aient jamais exercé la sagacité des ingénieurs.

Le chemin de Vienne à Trieste traverse, entre Gloggnitz et Murzzuschlag, les Alpes Noriques; entre Lay-

(1) Il est même question d'organiser à Trieste un service de paquebots transatlantiques, tant les grandes puissances éprouvent le besoin d'établir des relations directes avec le Nouveau-Monde. Il paraît difficile cependant que Trieste puisse lutter sans trop de désavantage contre les ports de l'Océan, et détourner à son profit une partie notable du mouvement entre l'Europe et les États-Unis.

bach et Trieste, les Alpes Juliennes. Il est terminé et exploité jusqu'à Laybach, sauf la lacune du Semmering (Alpes Noriques), lacune que l'extrême activité imprimée aux travaux aura bientôt comblée.

Tracé. La discussion du projet pour la traversée du Semmering a passé par les mêmes phases qu'en Bavière pour le passage du Fichtelgebirge, et elle a abouti au même résultat : la locomotive est restée maîtresse du terrain; on a pu d'ailleurs se renfermer dans les mêmes limites pour l'inclinaison, mais à condition de répartir les rampes par des inflexions plus brusques et plus multipliées encore (Pl. VI, *fig.* 1). Le rayon de courbure descend jusqu'à 190 mètres; mais sur rampe de 0,025, il ne s'abaisse pas au-dessous de 285 mètres, et la longueur maximum de l'arc est de 385 mètres. Le chemin franchit la ligne de faîte à 883 mètres au-dessus du niveau de l'Adriatique, à 462 mètres au-dessus de la station de Gloggnitz, distante de $28^k,8$, et à 217 mètres au-dessus de la station de Murzzuschlag, éloignée de 12 kilomètres. Sur le versant Nord, la hauteur rachetée pour les 8 premiers kilomètres à peu près, c'est-à-dire de Gloggnitz à Payerbach, est seulement de $69^m,6$; la pente moyenne, à partir de ce point jusqu'au sommet, est de 0,019; elle est de 0,018 sur le versant méridional; la répartition des inclinaisons qui varient de 0 à 0,025 est indiquée sur le profil en long (*fig.* 2).

C'est seulement sur le versant Nord que la limite de 0,025 est atteinte, et sur une longueur totale de 4.676 mètres. La plus longue de ces rampes au 1/40e, précédée seulement par un court palier de 630 mètres, a un développement de 3.170 mètres. Le tracé du Semmering est donc, sous ce rapport, plus simple que celui du Fichtelgebirge, qui présente une rampe continue au 1/40e de 5.400 mètres de long; mais aussi la

hauteur totale à racheter est beaucoup plus grande au Semmering, le tracé bien plus tourmenté en plan, et la puissance qu'on voulait obtenir des locomotives bien plus considérable. Il y avait là un ensemble de conditions difficiles à concilier, et de nature à entraîner des modifications plus ou moins profondes dans quelques-unes des dispositions essentielles des machines (1).

L'institution d'un concours auquel étaient admis tous les constructeurs nationaux et étrangers n'était cependant pas, de la part du gouvernement autrichien, un appel à des principes nouveaux dicté par l'impuissance absolue des ressources actuelles de l'art. La certitude d'une exploitation régulière par locomotives était à peu près acquise d'avance; l'exemple du Fichtelgebirge garantissait le succès au Semmering. Mais si les difficultés n'étaient pas insurmontables, elles exigeaient du moins quelques expédients nouveaux, et le concours devait substituer à de longs tâtonnements, difficilement compatibles avec les exigences du service, l'expérience des constructeurs stimulée par la perspective d'une prime élevée et par celle non moins efficace de la juste renommée qui s'attache à un progrès industriel. A défaut de découvertes brillantes, le concours devait faire surgir d'heureuses dispositions de détail, des germes de progrès dont l'expérience saurait ensuite tirer parti. On verra jusqu'à quel point cet espoir s'est réalisé.

Concours pour la construction des locomotives

Je rappelle d'abord les principales conditions du programme :

(1) On avait adopté en 1844 un projet qui limitait les inclinaisons à 0,01976 sur le versant nord et à 0,01998 sur le versant sud (*). Le tracé amendé est plus court de 2 kilomètres environ; il a surtout notablement simplifié les travaux d'établissement.

(*) *Notice sur les chemins de fer allemands en* 1844, par M. Baumgarten.

Conditions du programme.

1° Les machines devaient remorquer, à la vitesse de 11k,38, et sur les parties les plus difficiles du chemin, une charge brute de 140 tonnes, tender non compris.

2° La vitesse devait être portée à 30k,27 au moins, sans affecter la régularité du mouvement et la stabilité de la machine.

3° Les machines devaient être pourvues de moyens d'arrêt d'un effet prompt et assuré. Lancées à la vitesse de 30k,27 sur les pentes de 0,025, elles devaient pouvoir être arrêtées après un parcours de 150 mètres au plus. La charge des roues susceptibles d'être calées devait s'élever à moitié au moins du poids de la machine; si elle avait un tender séparé, les roues de celui-ci devaient aussi pouvoir être calées très-promptement.

4° Aucune des roues ne pouvait porter plus de 7 tonnes.

5° La pression absolue de la vapeur ne devait pas excéder 9 atmosphères.

6° Les chaudières devraient être construites et essayées conformément aux règlements en vigueur.

7° Les machines devaient marcher au bois.

8° Leur largeur maximum ne pouvait excéder 2m,845.

Toute machine ayant rempli, dans douze voyages d'essai au moins, sur vingt au plus, les conditions précédentes, était déclarée admissible au concours. La comparaison entre les machines admises devait d'ailleurs s'établir, soit d'après la manière plus ou moins large dont elles remplissaient les conditions absolues, soit d'après la consommation de combustible, d'après la facilité de leur conduite, la régularité de la vaporisation, la solidité de leurs divers organes, en un mot d'après l'ensemble de leurs propriétés, dont plusieurs échappent nécessairement à une mesure précise, numérique. Le prix pouvait donc être décerné à une machine inférieure, sous quelques rapports essentiels, à

ses rivales. Outre le prix principal, trois autres étaient institués en faveur des machines placées au deuxième, au troisième et au quatrième rangs.

Le nombre des concurrents qui ont répondu à l'appel du gouvernement autrichien est très-restreint; il est de quatre, comme celui des prix (1). Machines présentées au concours.

Les quatre machines présentées étaient :

Bavaria, construite par Maffeï de Munich.

Wiener-Neustadt, des ateliers de Günther à Wiener-Neustadt.

Seraing, envoyée par l'établissement célèbre dont elle porte le nom.

Vindobona, construite dans les ateliers du chemin de Vienne à Gloggnitz.

Le *Bavaria* (Pl. VII, *fig.* 1) est une machine américaine à huit roues, à cylindres extérieurs et horizontaux. L'essieu moteur est l'essieu d'arrière, placé au delà de la boîte à feu : il est accouplé au moyen de bielles ordinaires avec l'autre essieu fixe. La *Bavaria* n'est, en un mot, aux dimensions près, qu'une machine américaine, et à quatre roues couplées, ordinaire. Elle présente une seule particularité : l'essieu d'arrière de l'avant-train mobile et l'essieu antérieur du tender sont reliés, l'un au premier l'autre au second essieu fixes, par des chaînes sans fin qui s'enroulent sur des poulies dentées calées au milieu de ces essieux. La transmission du mouvement de rotation ainsi établie est complétée, pour les essieux respectivement parallèles de l'avant-train et du tender, au moyen de bielles de connexion, 1° *Bavaria*.

(1) On pouvait prévoir que les constructeurs seraient peu disposés à courir des chances sérieuses de sacrifices sans compensation, et qu'ils n'entreraient dans la lice qu'avec la certitude à peu près complète de remplir les conditions *absolues* et d'être au moins indemnisés par un des prix secondaires.

de sorte que tout le poids du moteur est utilisé pour l'adhérence. Cette machine est pourvue de la détente variable de Meyer, qui est fort en faveur en Allemagne et surtout en Autriche. La coulisse, qu'on a conservée comme le mode de liaison le plus simple des barres d'excentriques, ne sert dès lors que pour le changement de marche.

Poids de la machine		49^t,28, dont	22^t,51 sur les 2 paires de roues antérieures. 26^t,77 sur les 2 paires de roues postérieures.
Id. du tender		12^t,32	
Id. de l'eau ou du bois		6^t,72	
Poids total pour l'adhérence		68^t,32	
Corps cylindrique	Diamètre	1^m,60	
	Longueur	4^m,12	
Nombre des tubes		250	
Surface de chauffe		182 m. q.	
Pistons	Diamètre	0^m,506	
	Course	0^m,762	
Diamètre des roues		1^m,100	
Écartement des essieux parallèles		2^m,950 pour la machine.	
		2^m,740 pour le tender.	

2° Wiener-Neustadt. Cette machine (*fig.* 2) s'écarte plus des types ordinaires que la précédente ; la chaudière est simple et fort longue, mais tout le système du moteur et du véhicule est double et disposé symétriquement de part et d'autre du milieu du châssis général. Ce châssis s'appuie sur deux trains mobiles à quatre roues. Chacun de ces trains porte deux cylindres, qui sont dès lors indépendants du système de la chaudière et du bâtis. Ces cylindres sont extérieurs, horizontaux, et placés à l'extrémité intérieure de chacun des trains, c'est-à-dire vers le milieu de la machine et près de la prise de vapeur. Un tuyau de prise unique se ramifie en quatre, qui viennent aboutir à autant de boîtes de distribution. Les quatre conduits d'échappement viennent de même

s'embrancher sur un seul tronc, que surmonte la tuyère.

La machine porte son approvisionnement. Le bois est empilé derrière la plate-forme du mécanicien, et l'eau, contenue dans deux réservoirs latéraux R, R, d'une capacité totale de $8^{m3},35$. Tout le poids est ainsi réparti sur huit roues, au lieu de quatorze. La division de l'appareil moteur en deux groupes indépendants respectivement solidaires avec les deux trains mobiles, tranche radicalement la difficulté en ce qui concerne l'adhérence de toutes ces roues.

Poids de la machine. . . .	$51^t,74$, dont	$26^t,04$ sur le train antérieur. $25^t,70$ sur le train postérieur.
Id. de l'approvisionnement	$9^t,47$	
	$61^t,21$	

Longueur du corps cylindrique.		$6^m,40$
Nombre des tubes.		180
Surface de chauffe.		175 m. q.
Pistons (*quatre*).	Diamètre.	$0^m,329$
	Course.	$0^m,632$
Diamètre des roues.		$1^m,106$
Écartement des essieux parallèles.		$2^m,40$

La disposition générale de cette machine (Pl. VII, *fig.* 3 et Pl. VIII et IX) présente une grande analogie avec celle de la précédente; mais la symétrie est poussée plus loin encore, elle s'étend même à l'appareil de vaporisation; il équivaut à l'ensemble de deux chaudières ordinaires qu'on adosserait l'une à l'autre après avoir enlevé les parois postérieures des deux boîtes à feu juxtaposés; la disposition du mécanisme et du véhicule est d'ailleurs la même que dans le *Wiener-Neustadt*, sauf la position intérieure relativement aux roues et par suite la légère inclinaison des cylindres. Les deux paires de cylindres sont reportées vers les extrémités de l'appareil, au lieu d'être groupées vers le milieu, occupé dans cette machine par la partie inférieure 3° *Seraing*.

de la double boîte à feu. Chaque couple de cylindres a une prise de vapeur et un échappement distincts.

Les foyers et les tubes formant deux systèmes indépendants, il y a deux portes de chargement placées latéralement et du même côté. La plate-forme des machines ordinaires est remplacée par deux galeries latérales affectées, l'une spécialement au mécanicien, l'autre au chauffeur, et auxquelles on a pu donner une largeur suffisante, en adoptant la forme elliptique pour les deux corps de chaudière. Une partie du bois est approvisionnée, à portée du chauffeur, sur la galerie qui lui est réservée. Il y a un tender spécial de petites dimensions, et porté par quatre roues dont l'adhérence n'est pas utilisée.

Poids de la machine.		$56^t,05$	
Longueur du corps cylindrique.		$3^m,26$	(dans chaque chaudière).
Diamètre *id.* . . .	vertical.	$1^m,24$	
	horizontal.	$1,^m04$	
Nombre des tubes.		170	*Id.*
Surface de chauffe.		$172^{m2},00$	
Pistons (*quatre*). .	Diamètre.	$0^m,406$	
	Course. . .	$0^m,305$	
Diamètre des roues.		$1^m,06$	
Écart. des essieux parallèles. .		$2^m,11$	
Longueur totale de la machine.		$12^m,24$	

Je dois à l'obligeance de MM. Pastor et Hemminger, directeur et secrétaire de la société Cockerill, la communication des dessins complets de cette remarquable machine, dont les détails méritent une étude attentive. On trouvera du reste dans l'explication placée à la fin du volume, les éclaircissements nécessaires à l'intelligence des planches VII, VIII et IX.

4° Vindobona. Cette machine (Pl. VII, *fig.* 4) ne diffère de certains types connus que par ses grandes dimensions et ses formes ramassées. Le constructeur s'est attaché à obtenir, surtout par l'accroissement des dimensions transversales

de la chaudière et l'addition d'un bouilleur longitudinal dans le foyer, la surface de chauffe nécessaire; et il a cru pouvoir compter uniquement sur la petitesse relative de la longueur, et par suite sur l'écartement modéré des essieux extrêmes, pour assurer la liberté du mouvement dans les courbes. La *Vindobona* est donc simplement une machine à chaudière elliptique, à double foyer, à essieux parallèles et accouplés dès lors à la manière ordinaire, à roues motrices placées à l'arrière et au delà de la boîte à feu, et à cylindres extérieurs. Dans son état primitif elle n'avait que six roues, et ne remplissait pas la condition relative au maximum de charge des roues; la limite était notablement dépassée pour les roues antérieures. Le constructeur dut, en conséquence, intercaler un quatrième essieu entre les deux premiers. Tout l'approvisionnement est porté par un tender à six roues, dont l'adhérence n'est pas utilisée.

Poids de la machine... 47^t,26, ainsi répartis........	Roues antérieures. .	11^t,536
	Les deux paires intermédiaires....	28^t,504
	Roues motrices. . .	7^t,224
Longueur du corps cylindrique............		3^m,26
Nombre des tubes....................		288
Surface de chauffe....................		174^{mq},00
Pistons...........	Diamètre.........	0^m,420
	Course..........	0^m,578
Diamètre des roues....................		0^m,948
Écartement des essieux extrêmes............		4^m,50

Épreuves.

1° Épreuves absolues.

Épreuves absolues.

Les épreuves d'admissibilité ont dû porter d'abord sur les points qui intéressent directement la sécurité. Ainsi la souplesse des machines dans les courbes, leur stabilité dans les limites de vitesse indiquées, l'efficacité des moyens d'arrêt sur les pentes, étaient au premier rang. Aucune tolérance ne pouvait être admise à cet égard.

Les expériences ont été faites sur la section de *Payerbach* à *Eichberg* qui présente, accumulées sur un parcours de 6^k,17, les principales difficultés du tracé. Voici, du reste, la récapitulation des accidents, en profil et en plan, de cette partie de la ligne :

PROFIL. inclinaison.	PROFIL. longueur.	PLAN.	
	kilom.		kil.
Palier.	0,474	Alignements droits.	2,342
0,0026	0,457	Courbes, au nombre de 30, et à rayons variables de 274 à 190 mètres.	3,824
0,0030	0,164		6,166
0,0100	0,634		
0,0143	0,048		
0,0167	0,114		
0,0217	0,107		
0,0232	0,078		
0,0250	3,292		
	6,166		

1° Passage dans les courbes.

Les machines *Bavaria*, *Seraing et Neustadt* ont franchi sans difficulté, à la vitesse de 38 kilomètres, les courbes les plus roides ; mais, ainsi qu'il était facile de le pressentir, la *Vindobona* n'a pu circuler sans trop de gêne dans ces courbes qu'en découplant l'essieu antérieur et en donnant du jeu aux boîtes, c'est-à-dire en sacrifiant, pour l'adhérence, une charge de 11^t,5.

Quant à l'arrêt :

2° Arrêt à la descente.

			m.	
La *Bavaria*, lancée avec son tender seulement sur la pente au 1/40e à la vitesse de 37^k,9, a été réduite au repos après un parcours de.			84	A partir de la mise en action des freins.
La *Neustadt*, à la vitesse de	37^k,9,	au bout de	57	
La *Seraing*, —	31^k,7	—	76	
La *Vindobona*, —	30^k,5	—	133	

Tandis que le programme laissait, dans l'état ordinaire des rails, une latitude de 150 mètres, à la vitesse de 30 kil.

3° Charge remorquée.

Les quatre machines ont rempli aussi la condition absolue de puissance : la première, très-largement, la dernière, en atteignant strictement le minimum. Elles étaient donc toutes admissibles au concours.

2° Épreuves comparatives.

Elles ont eu lieu, comme les précédentes, entre Payerbach et Eichberg. On constatait non-seulement la charge, la vitesse, la consommation, mais aussi tous les faits propres à établir une comparaison complète entre les machines.

La régularité du jeu d'une machine, la facilité avec laquelle elle reproduit des circonstances identiques ou équivalentes de travail et de consommation, est un élément d'appréciation très-important de sa valeur réelle : un jugement fondé sur un petit nombre d'observations est peu concluant d'ailleurs, si cette régularité, cette permanence de l'effet produit, n'existent pas à un degré suffisant. Les moyennes seules seraient donc médiocrement significatives, et il convient de reproduire les résultats individuels des épreuves.

I. *Bavaria.* *Bavaria.*

	Vitesse moyenne de Payerbach à Eichberg.	Pression moyenne effective.	Charge brute remorquée.	Charge brute rapportée à la vitesse de 7k,587 (1 mille d'Autriche).	CONSOMMATION de bois		Moment mécanique par kilogramme de combustible.
					par kilomètre de train.	par tonne brute-kilomètre.	
	kilom.	atm.	tonnes.	tonnes.	kilog.	kilog.	
1	16,39	7,05	171	369	167	0,97	2,21
2	18,21	6.85	172	413	131	0,76	3,15
3	17.68	6.86	172	400	154	0,90	2,60
4	17,30	6,85	172	393	127	0,74	3,09
5	18,66	7,00	173	426	154	0,90	2.76
6	19,27	7,05	173	410	145	0,84	3,01
7	16,77	6.80	190	420	150	0,80	2,80
8	17.22	7,00	190	431	154	0,81	2,80
9	18,36	7,00	188	459	154	0,82	2.98
10	16,92	6,70	188	423	154	0,82	2,74
11	16,96	»	190	418	154	0,81	2,71
12	16,92	6,49	191	425	140	0,73	3,01
	17,55	6,88	181	418	149	0,825	2,82

Le programme admettait, pour simplifier la comparaison des résultats numériques, la proportionnalité du travail de la machine dans l'unité de temps, au produit

de la charge par la vitesse; loi qui suppose la résistance à la traction indépendante de la vitesse, et néglige de plus l'influence de celle-ci sur les conditions même de la production du travail. Cette règle est, du reste, admissible quand il s'agit, comme ici, de variations de la vitesse comprises entre des limites très-peu étendues.

Seraing.

II. *Seraing.*

	Vitesse moyenne de Payerbach à Eichberg.	Pression moyenne effective.	Charge brute remorquée.	Charge brute rapportée à la vitesse de 7k,587 (1 mille d'Autriche).	CONSOMMATION de bois par kilomètre de train.	CONSOMMATION de bois par tonne brute-kilomètre.	*Moment mécanique* par kilogramme de combustible.
	kilom.	atm.	tonnes.	tonnes.	kilog.	kilog.	
1	17,15	3,48	142,5	321	158	1,11	2,03
2	14,57	5,98	142,5	274	163	1,14	1,68
3	13,35	5,19	152	267	167	1,10	1,60
4	12,90	5,76	152	258	186	1,22	1,39
5	15,32	5,25	141,5	286	159	1,12	1,80
6	16,69	5,41	140,5	309	177	1,26	1,74
7	16,92	4,83	141	314	167	1,18	1,88
8	16,08	5,40	141	298	159	1,13	1,87
9	15,71	5,32	142	294	159	1,12	1,85
10	16,24	5,32	140	300	163	1,16	1,84
11	15,93	5,11	140	295	163	1,16	1,80
12	15,87	4,68	143	300	154	1,08	1,94
	15,56	5,14	143	277	164	1,15	1,78

W. Neustadt.

III. *Wiener-Neustadt.*

	Vitesse moyenne de Payerbach à Eichberg.	Pression moyenne effective.	Charge brute remorquée.	Charge brute rapportée à la vitesse de 7k,587 (1 mille d'Autriche).	CONSOMMATION de bois par kilomètre de train.	CONSOMMATION de bois par tonne brute-kilomètre.	*Moment mécanique* par kilogramme de combustible.
1	12,52	7,20	153	253	200	1,31	1,27
2	12,29	7,29	153	249	172	1,11	1,45
3	11,46	7,05	140	211	177	1,26	1,19
4	16,31	7,91	141	304	140	1,00	2,17
5	15,25	7,20	141	284	136	0,96	2,09
6	14,42	7,19	141	268	145	1,03	1,85
7	14,42	7,05	137	270	149	1,09	1,81
8	14,64	7,05	137	277	149	1,09	1,86
9	14,60	»	142	274	136	0,96	2,01
10	8,78	»	142	301	136	0,96	2,21
11	17,07	»	143	321	118	0,82	2,72
12	16,00	»	143	302	113	0,79	2,67
13	14.64	»	143	279	113	0,79	2,47
	14,03	7,24	143	276	145	1,01	1,98

Ces deux machines n'ont pu dépasser notablement le minimum réglementaire de la charge. La légère augmentation de 12 tonnes (expériences 3 et 4) qu'on a cherché à imposer à la *Seraing*, exerçait sur la consommation et surtout sur la vitesse une influence très-prononcée hors

de proportion avec l'accroissement du point du train; aussi le constructeur préféra-t-il user de son droit et s'en tenir dans les épreuves suivantes, à la charge minimum, plus favorable tant à l'effet utile total qu'à l'effet utile rapporté au combustible consommé.

IV. *Vindobona*.

Vindobona.

	Vitesse moyenne de Payerbach à Eichberg.	Pression moyenne effective.	Charge brute remorquée.	Charge brute rapportée à la vitesse de 7k,587 (1 mille d'Autriche).	CONSOMMATION de bois par kilomètre de train.	CONSOMMATION de bois par tonne-brute-kilomètre.	*Moment mécanique* par kilogramme de combustible.
	kilom.	atm.	tonnes.	tonnes.	kilog.	kilog.	
1	12,44	8,25	145	232	140	0,96	1,66
2	14,34	7,99	144	272	136	0,94	2,00
3	14,04	7,92	145	266	158	1,09	1,68
4	13,28	7,84	145	252	158	1,09	1,60
5	13,66	7,84	145	261	145	1,00	1,80
6	13,58	7,77	145	258	154	1,06	1,70
7	15,63	7,79	144	297	158	1,10	1,88
8	14,84	7,70	144	272	145	1,00	1,87
9	15,63	7,78	144	297	150	1,04	1,98
10	13,58	7,75	144	258	158	1,10	1,63
11	11,84	7,65	144	225	172	1,20	1,31
12	12,82	7,98	144	244	177	1,23	1,37
	13,74	7,85	144,40	261	154	1,07	1,71

140 tonnes, à la vitesse de 11k,38, équivalent, d'après la règle pratique indiquée, à 210 tonnes remorquées à la vitesse de 7k,587 (1 mille); or les puissances absolues sont:

Puissances absolues.

Pour: *Bavaria*, *Sereing*, *Neustadt*, *Vindobona*,
418 277 276 261 t. à la vitesse d'un mille.

Ces machines possèdent donc un excès de puissance égal respectivement à

100 o/o, 32 o/o, 31,4 o/o, 24 o/o

du maximum fixé par le programme.

La *Bavaria* présente, comme on voit, une régularité très-remarquable de vitesse, de pression, de consommation, et une supériorité soutenue, pour la puissance comme pour l'économie du combustible; le prix lui revenait donc de droit. Elle était loin d'ailleurs d'avoir

Supériorité de la *Bavaria*, sous le rapport de la puissance et de l'économie de combustible.

atteint dans ces épreuves la limite de l'effort de traction dont elle est susceptible ; elle a parcouru ensuite en 28 minutes, c'est-à-dire à la vitesse moyenne de $14^k,4$, les $6^k,17$ de *Payerbach* à *Eichberg*, en remorquant une charge brute de $224^t,56$, et consommant, retour compris, 1.246 kilogrammes de bois. La pression oscillait entre 6,67 et 7,7 atmosphères effectives.

La *Vindobona* pouvait soutenir la comparaison avec les autres, sauf la *Bavaria ;* mais le principe même de sa construction, son excessive rigidité, la plaçaient irrévocablement au quatrième rang.

Quant au deuxième rang, il était vivement disputé par la *Neustadt* et la *Serâing*. Avec des charges moyennes identiques, la seconde avait une consommation de 13 p. 100 plus élevée, mais aussi une vitesse plus grande de 11 p. 100. Entre de semblables résultats, il est impossible de dire, dans l'état actuel des choses, de quel côté penche la balance. Toutefois le mode de comparaison admis par le programme faisait ressortir une légère différence numérique en faveur de la *Neustadt*.

Classement de la *Neustadt* et de la *Seraing*.

L'effet utile du combustible devait, aux termes du programme, trancher le différend entre les machines équivalentes d'ailleurs, et on devait prendre pour mesure de cet effet la charge brute rapportée à l'unité de vitesse, divisée par le combustible consommé. C'est ce quotient qui figure dans les tableaux précédents sous ce titre : *moment mécanique* par kilogramme de combustible ; expression qui n'a pas de sens précis, et qu'on a choisie sans doute à dessein, car les nombres auxquels elle s'applique n'en ont évidemment pas davantage.

L'effet utile du combustible est donc, d'après cette convention, représenté

Pour les machines :	*Bavaria*,	*Neustadt*,	*Seraing*,	*Vindobona*,
Par les chiffres :	2,82	1,98	1,78	1,71

qui ont déterminé le classement définitif de la seconde et de la troisième.

3° Épreuves postérieures au concours.

Bavaria.

VITESSE moyenne.	PRESSION moyenne effective.	CHARGE brute remorquée.	CHARGE brute rapportée à la vitesse d'un mille.	CONSOMMATION par train-kilomètre.	CONSOMMATION par tonne-brute-kilomèt.
kilom.	atm.	tonnes.	tonnes.	kilog.	kilog.
17,15	7,92	191,0	432	136	0,71
17.15	*id.*	144,4	326	100	0,69
15,86	*id.*	142,6	298	104	0,73
20,11	*id.*	144,0	382	113	0,78
19,12	*id.*	144,4	364	115	0,82
17,88	7,92	153,3	360	112	0,75

Wiener-Neustadt.

17,37	7,92	141	323	113	0,80
15,25	*id.*	142	285	122	0,86
14,64	*id.*	142	274	140	1,00
15,76	7,92	141,6	294	125	0,89

Seraing.

15,48	»	142	290	141	1,02
15,56	»	142	291	149	1,05
15,56	»	142	291	149	1,05
17,60	»	142	329	149	1,05
16,16	»	142	302	141	1,00
16,07	»	142	305	146,6	1,03

Ces nouvelles épreuves ont donc confirmé les résultats des précédentes, et constaté pour les trois machines, pour la *Neustadt* surtout, un progrès très-notable dans l'économie de combustible.

Expériences faites sur deux machines ordinaires.

1° *Save.*

Quelques essais comparatifs ont été faits sur deux des machines ordinaires affectées au service de la section de Murzzuschlag à Gratz. L'une, la *Save*, machine américaine à huit roues, pesant 18^t,3 dont 12^t,5 sur les quatre roues couplées, a été mise en expérience sur la rampe au 1/40 de Payerbach à Küb, sur laquelle le rayon de courbure minimum est de 285 mètres. Elle marcha d'abord à vide, puis avec des charges graduellement croissantes, et parvint à remorquer par un temps

favorable, à la vitesse de 26^{k},55, trois wagons à huit roues et le tender, c'est-à-dire 62 tonnes.

2° *Quarnero*. La seconde machine, *Quarnero*, appartient au même type que la précédente, mais elle est beaucoup plus forte :

Poids : 26 tonnes dont 20 sur les deux paires de roues adhérentes.

Tubes. .	Nombre.	140
	Longueur.	4^{m},118
Surface de chauffe.		89^{m2},00
Pression normale effective.		5 atm.
Pistons.	Diamètre..	0,^{m}358
	Course..	0,559

Elle a été, comme les quatre machines spéciales, mise en expérience sur toute l'étendue comprise entre Payerbach et Eichberg.

	VITESSE moyenne.	PRESSION moyenne effective.	CHARGE brute remorquée.	CHARGE brute rapportée à la vitesse de 7^{k},587 (1 mille d'Autriche).	CONSOMMATION de bois par kilomètre de train.	CONSOMMATION de bois par tonne-brute-kilom.
	kilom.	atm.	tonnes.	tonnes.	kilog.	kilog.
1	17,15	5	69,5	157	77	1,11
2	17,45	5	68,3	157	59	0,86
3	17,60	5	68,3	158	72	1,05
4	18,16	5	67,6	168	68	1,00
5	10,24	5	86,8	117	100	1,15
	16,12	5	72,1	151	75	1,03

La consommation par tonne-kilomètre est donc à peu près la même que pour les machines *Seraing*, *Wiener-Neustadt* et *Vindobona*.

En comparant pour les cinq machines expérimentées les puissances moyennes et les poids, on a :

	BAVARIA.	SERAING.	WIENER-NEUSTADT.	VINDOBONA.	QUARNERO.
Poids.	49^{t},28	56^{t},05	51^{t},74	47^{t},26	26^{t},00
Puissance. . . . (Tonnes à la vitesse de 7^{k},587.)	418	277	276	261	151
Rapport. . . .	8,48	4,94	5,33	5,52	5,80

La puissance rapportée soit au combustible con-

sommé, soit au poids de la machine, est donc à peu près la même pour la *Quarnero* d'une part, et de l'autre pour les machines spéciales, la *Bavaria* exceptée; les rapports essentiels ne sont donc pas sensiblement modifiés par la différence d'échelle.

On avait reproché au programme d'accumuler des conditions trop sévères : elles ont cependant été remplies et au delà, surtout par une machine qui ne présente aucune innovation. Comparaison des machines au point de vue du service régulier.

Mais quoique très-remarquables assurément, les résultats donnés par la *Bavaria* ne prouvent pas qu'elle ait complétement résolu le problème, ni même qu'elle soit en réalité supérieure à la *Neustadt* et à la *Seraing*. Cette machine a dû son succès à l'heureux équilibre de ses proportions, à l'application d'une détente prolongée, et vraisemblablement aussi à l'habileté de son conducteur et à la durée très-courte de la période d'épreuve. Il n'y a rien de plus ingénieux que le succès : la construction de la *Bavaria* est ingénieuse à ce titre, mais à ce titre seulement. Le principe de la disposition adoptée pour la transmission du mouvement de rotation entre les essieux non assujettis au parallélisme est abandonné depuis longtemps (1). Si les constructeurs de W. Neustadt et de Seraing ne l'ont pas appliqué, c'est, à coup sûr, parce qu'ils l'ont rejeté comme vicieux. Il y avait, de la part de M. Maffeï, une certaine hardiesse à exhumer ce vieil expédient; les épreuves passagères du concours lui ont donné raison : en sera-t-il de même de l'épreuve permanente du service régulier? 1° *Bavaria*.

Les détails de l'appareil de connexion ont été du reste étudiés avec beaucoup de soin : chacune des roues dentées se compose : 1° d'un moyeu portant une nervure Construction des chaînes et des roues d'accouplement.

(1) Il a été appliqué par G. Stephenson en 1814 et par Chapman dès 1812.

circulaire *n*, *n* (Pl. VII, *fig*. 8) calé sur l'essieu au moyen d'une grosse clavette et de deux fortes frettes *f*, *f*; 2° de deux plateaux *p*, *p* (*fig*. 6, 7, 8) appliqués de part et d'autre de la nervure et réunis par dix boulons; 3° de dix ergots *d*, serrés entre les plateaux, auxquels chacun d'eux est fixé par un boulon. La chaîne sans fin (*fig*. 5, 6, 7) est disposée comme celles des montres, c'est-à-dire formée alternativement d'un et de deux maillons en acier, ayant à peu près la même section totale. L'espace libre entre les milieux des maillons conjugués reçoit les dents des roue : les maillons sont assemblés non par des goupilles rivées, mais par des boulons à écrous et contre-écrous (*fig*. 8). On voit que le constructeur s'est attaché surtout à atténuer les conséquences d'une rupture, et à n'exiger en pareil cas, au lieu d'une longue réparation, qu'une remplacement partiel, facile et prompt.

Les organes d'accouplement avaient franchi sans rupture la période des épreuves, c'est-à-dire un parcours total de 524 kilomètres. La chaîne du tender était alors intacte. Celle de la machine n'avait pas éprouvé encore d'avaries graves, mais quelques boulons étaient légèrement fléchis.

Nouvelles épreuves de l'appareil de connexion.

La commission du concours jugea dès lors nécessaire de soumettre la *Bavaria* à de nouvelles épreuves, surtout pour apprécier la valeur pratique du mode de connexion. La *Bavaria* fit donc pendant tout l'hiver 1851-52, entre Gloggnitz et Eichberg (13 kilomètres), de nombreux voyages qui ont porté à 1.783 kilomètres son parcours total au 26 mars 1852.

Ruptures de la chaîne.

La chaîne de la machine s'est rompue pour la première fois, après un service 1.244 kilomètres, pendant que la *Bavaria* remorquait de Payerbach à Gloggnitz, un train de 119 tonnes; un boulon se brisa : l'oxydation d'une partie du grain indiquait une rupture graduelle.

Une seconde rupture, identique d'ailleurs, eut lieu après un nouveau parcours de 76 kil. seulement. La chaîne, ou tout au moins les boulons, semblaient donc être énervés, et les ruptures menaçaient de se succéder rapidement.

Un examen minutieux constata que plusieurs boulons étaient pliés, quelques maillons gauchis, et la chaîne allongée de $0^m,068$. Cet allongement expliquait les ruptures produites ; quelques maillons du brin non tendu chevauchaient sur leurs voisins, et un choc brusque avait lieu à l'instant où ils reprenaient, en se tendant, leur position normale. Cet allongement ne provenait pas, du reste, de l'étirage du métal, mais de l'insuffisance du diamètre des boulons, qui, trop faibles d'ailleurs pour leur propre compte, refoulaient le métal des maillons, soumis à une pression concentrée sur une trop petite surface. Les œils s'étaient en effet sensiblement évasés.

Les épreuves furent reprises après avoir ramené la chaîne à sa longueur primitive, et remplacé les boulons fléchis, en portant leur diamètre de $0^m,023$ à $0^m,030$. Il n'y eut plus de ruptures à partir de ce moment, mais on avait la précaution d'examiner fréquemment la chaîne, et de remplacer les boulons faussés. Le 26 mars, on avait remis 26 boulons sur 69 : la chaîne avait pris un allongement de $0^m,013$ seulement.

En somme, la commission pense qu'avec le nouveau diamètre des boulons, en employant pour les maillons de l'acier de meilleure qualité, il sera facile de prévenir l'allongement de la chaîne ; et que soustraite ainsi à la cause de rupture la plus grave, elle pourra faire un bon service. Quant à la torsion à laquelle les essieux sont soumis, elle ne paraît pas constituer un inconvénient sérieux : il suffit d'augmenter leur diamètre en conséquence.

Ces nouvelles expériences ont permis d'ailleurs d'apprécier l'influence qu'exerceront sur les conditions du Influence de la mauvaise saison.

service, l'hiver très-rude dans cette contrée, la pluie et surtout le vent et la neige. Le patinage était très-rare, même avec des charges de 206 tonnes; en un mot, la moyenne des résultats d'hiver n'est pas notablement inférieure à celle des résultats d'été.

Les observations les plus récentes semblent donc jusqu'à un certain point confirmer le succès de la *Bavaria*. En matière de locomotives surtout, la simplicité des combinaisons est une condition de rigueur : chercher seulement, comme l'a fait le constructeur de Munich, à tirer parti des dispositions appliquées et connues avant lui, était-ce simplement de la stérilité d'idées, était-ce au contraire juger sainement les conditions du problème? Malgré l'avis de la commission, le doute subsiste encore à cet égard.

2° *Vindobona.*

L'exagération du même principe rendait évidente *à priori* l'infériorité de la *Vindobona*, dont la rigidité et l'empatement seraient déjà excessifs pour des courbes de 4 à 500 mètres. Ce parti pris de conserver purement et simplement le matériel anglais était inspiré sans doute par le succès obtenu au Fichtelgebirge, mais dans des conditions de tracé assez différentes pour mettre en garde contre l'abus des analogies.

3° et 4° *Wiener-Neustadt et Seraing.*

La *W. Neustadt* et la *Seraing*, dont le principe est emprunté aux *wagons* américains, présentent des dispositions qui ont au moins le mérite d'être nouvelles, et d'attaquer franchement les difficultés. L'indépendance des cylindres et de la chaudière complique un peu l'admission et l'échappement; mais on en est quitte pour placer sur les conduites des articulations à rotule. Il y a longtemps du reste que M. Verpilleux a réussi, dans ses machines à tender-moteur, à concilier la flexibilité des conduites métalliques avec une imperméabilité absolue pour la vapeur à haute pression.

La *Seraing* diffère plus encore que la *W. Neustadt* des types connus. Sa symétrie complète a des avantages et des inconvénients, mais ceux-ci paraissaient être compensés et au delà par les premiers.

Inconvénients.

La réunion du mécanicien et du chauffeur est en général une garantie de bonne conduite de la machine, de sécurité pour la marche : ces deux agents sont séparés dans la *Seraing*. L'émission de la vapeur par un orifice unique est une des conditions essentielles de l'activité du tirage ; dans cette machine, l'échappement est divisé en deux jets distincts, circonstance qui explique en partie la difficulté avec laquelle elle se maintenait en vapeur. On lui reproche enfin de *primer* outre mesure sur les rampes.

Avantages.

1° Les foyers sont soustraits au danger des coups de feu.

Voilà les inconvénients, voici les avantages. Pour les chaudières de forme ordinaire, le danger des coups de feu croît avec la longueur de l'appareil et avec l'inclinaison du profil. Il faut pour se mettre en garde contre ce danger marcher, *à la descente*, avec une chaudière très-remplie. Dans la *Neustadt*, par exemple, la différence de niveau des extrémités d'un même tube s'élève, sur les rampes au 1/40, à $0^{m},16$. Si on abordait de semblables inclinaisons, même avec une hauteur d'eau plus que suffisante pour la marche sur niveau, l'émersion aurait lieu, pour les tubes supérieurs, à la montée, et pour le haut du foyer à la descente. La longueur des chaudières ordinaires est donc limitée, abstraction faite de la forme du tracé en plan, par l'inclinaison des rampes. Pour allonger les tubes au delà d'un certain point, il faut ou diminuer leur nombre, afin de conserver la même hauteur moyenne au plan d'eau, ou élever le niveau et accepter la conséquence immédiate de ce relèvement, c'est-à-dire un crachement immodéré.

La *Seraing* primait nécessairement encore plus que

la *Neustadt*. La longueur totale du tube est la même, mais la distance et par suite la différence de niveau de ses extrémités étaient de 1/3 plus grandes dans la *Seraing*, et il fallait dès lors marcher avec un niveau plus élevé encore, si on voulait que les tubes pussent s'incliner sans percer le plan d'eau. Mais il n'était sans doute pas indispensable de s'astreindre à cette condition : la rangée de tubes supérieure peut sans grand inconvénient se trouver accidentellement émergée sur une certaine longueur. A cette distance du foyer, on n'a pas à craindre les coups de feu qui n'ont d'ailleurs qu'une gravité relativement très-faible, quand ils atteignent seulement les tubes. En cessant de s'assujettir à maintenir dans la *Seraing* les tubes entièrement noyés sur les rampes, on aurait certainement réduit beaucoup le crachement qu'on lui reproche. L'avantage que présente la construction de sa chaudière, et qui ne paraît pas avoir été apprécié, est précisément de rendre la hauteur du niveau à peu près indépendante de l'inclinaison du profil, puisque le système des foyers n'éprouvant pas de dénivellation notable, est complétement à l'abri des coups de feu; tandis que les chaudières de forme ordinaire, celle de *la Neustadt* surtout à cause de sa longueur inusitée, sont exposées, à la descente, à brûler le ciel et la plaque tubulaire de leur foyer, si le mécanicien n'a pas eu la précaution de les remplir presque entièrement. Avec des tubes de 3^{m},40 de long, il n'est pas probable que le jeu des dilatations et des contractions entre les limites des températures de l'eau dans la chaudière, et des gaz dans la boîte à fumée, puisse exercer une influence bien nuisible sur les assemblages. L'expérience est à faire; et si elle prouvait seulement que la température des gaz altère le laiton, il suffirait d'employer des tubes en fer, comme

on le fait sans y être contraint par des motifs particuliers, sur quelques chemins de fer, sur la ligne d'Avignon à Marseille, par exemple. Au reste, quand on reconnaîtrait qu'il est nécessaire de marcher toujours avec les tubes entièrement noyés, et par suite avec la chaudière presque pleine sur les rampes, cet inconvénient serait à coup sûr compensé et bien au delà par l'avantage de soustraire le foyer aux suites d'une négligence.

La *Seraing* doit à sa symétrie, complète aux freins près, une propriété d'une importance secondaire sans doute, mais qui doit cependant entrer en ligne de compte; c'est qu'on est dispensé de la tourner sur les plaques. 2° On est dispensé de retourner la machine.

Quant aux dispositions du mécanisme, elle paraît également mieux conçue que la *Neustadt*. Les cylindres intérieurs, avec une seule boîte de distribution pour chaque paire, se concilient mieux avec l'accouplement et surtout avec leur mobilité relativement à la chaudière, que les cylindres extérieurs. Chacun des trains mobiles a pu d'ailleurs être rattaché au bâtis par une simple cheville ouvrière, tandis que dans la *Neustadt* il a fallu recourir à un mode d'articulation plus compliqué pour le train d'arrière, dont le milieu devait rester libre afin de recevoir la partie inférieure de la boîte à feu. 3° La position intérieure des cylindres simplifie le mécanisme. 4° La position des boîtes à feu simplifie l'articulation de l'un des trains.

A tout prendre, la machine *Seraing* me paraît donc mieux appropriée que les autres, sans en excepter la *Bavaria*, aux exigences d'un chemin présentant à la fois de très-fortes rampes et de très-petites courbes. La position du foyer a quelques inconvénients, mais elle le met à l'abri des coups de feu, danger si réel sur de semblables rampes. Les mécaniciens se laissent assez souvent surprendre, sur des inclinaisons bien plus faibles, par l'émersion du ciel du foyer. On sait que le moindre coup de feu sur la plaque tubulaire entraîne son remplacement immédiat, parce qu'il devient alors impos- *La Seraing* paraît la mieux appropriée à sa destination.

sible de rendre étanches les joints des tubes en serrant les viroles. Cette considération, secondaire dans les cas ordinaires, devient donc capitale dans celui-ci : on ne peut mettre en balance avec elle un peu plus de facilité dans la conduite de la machine, un peu plus d'économie de combustible. La *Bavaria* l'a emporté, mais il est probable que l'avenir appartient sinon à *la Seraing* telle qu'elle est, du moins aux principes essentiels de sa construction. La première ne paraît être véritablement qu'une solution d'expédient.

Puissance des machines du Semmering comparée à celle des machines déjà construites.

Si considérable qu'elle soit, la puissance des machines du Semmering est cependant inférieure à la limite atteinte précédemment par quelques constructeurs anglais. Sous ce rapport, les exigences du mouvement des marchandises sur les lignes à très-grand trafic et surtout celles de la vitesse, pour les voyageurs, ont devancé et dépassent encore jusqu'à présent celles des tracés les plus difficiles. La rivalité si active des deux largeurs de voie a contribué d'ailleurs plus encore que les besoins réels du service à stimuler les efforts des constructeurs, et c'est sous l'influence de cette surexcitation que la surface de chauffe a pu être portée à 200 mètres quarrés, et même au delà, dans des machines à voie étroite. Mais de semblables tours de force ne sont possibles, dans les machines à grande vitesse, qu'en exagérant la longueur et surtout le rapprochement des tubes, l'écartement des essieux, et en plaçant un bouilleur dans le foyer dont la capacité est alors à peine suffisante même pour des cokes de qualité supérieure, à moins de lui donner une longueur souvent inadmissible.

Latitude pour le diamètre des chaudières dans les locomotives à petite vitesse.

On n'a pas besoin de recourir à de semblables expédients dans les machines à vitesse très-réduite. Rien n'empêche alors d'exhausser le corps cylindrique et de lui donner un diamètre égal ou même supérieur

à la largeur de la voie, sans excéder la limite, assez large d'ailleurs, que la hauteur du centre de gravité ne doit pas dépasser; tandis que dans les machines à grande vitesse et par suite à grandes roues motrices, la distance des roues limite le diamètre de la chaudière, qui ne pourrait être placée beaucoup au-dessus de l'essieu moteur sans compromettre la stabilité. Le constructeur de la *Bavaria* a amplement usé de la latitude que lui laissait sur ce point le faible diamètre des roues, et c'est ainsi qu'il a pu obtenir une surface de chauffe largement suffisante sans donner aux tubes, comme dans la *W. Neustadt* et dans la *Seraing*, une longueur inusitée, et sans recourir, comme dans *la Vindobona*, à la forme elliptique imposée par la longueur beaucoup moindre, quoique déjà excessive dans ce cas, du corps de la chaudière.

Nouvelles machines à petite vitesse du chemin de fer du Nord.

Le diamètre de la *Bavaria* excède même la limite à laquelle on s'est arrêté jusqu'à présent sur les chemins à large voie : les machines du *Great-Western* ont des chaudières de $1^m,45$, chiffre qu'il serait facile, il est vrai, de dépasser, surtout pour les machines à marchandises, si la sécurité ne pouvait être gravement compromise par la tendance à l'accroissement simultané du diamètre et de la pression.

Bientôt sans doute, la *Bavaria* ne sera plus un exemple unique d'un diamètre aussi considérable dans les machines à voie étroite. Déjà ce diamètre est porté à $1^m,50$ dans les puissantes machines que la compagnie du chemin de fer du Nord destine spécialement au transport des charbons, et dont plusieurs viennent de lui être livrées (1).

(1) On verra avec intérêt les principales dimensions de ces

Avec les roues de $1^m,44$ de diamètre, l'arête supérieure du corps cylindrique de ces machines est à $2^m,82$ au-dessus des rails, et par suite, la cheminée réduite à une très-petite hauteur. Il fallait obtenir une très-grande puissance, c'est-à-dire une très-grande surface de chauffe, donner au foyer une longueur en rapport avec cette surface, et placer l'essieu d'arrière au delà de la boîte à feu, sans cependant admettre un écartement excessif des essieux extrêmes : la longueur du corps cylindrique était donc très-limitée, et un diamètre inusité devenait dès lors indispensable (1).

---

machines, dont la construction fait honneur à l'établissement du Creusot.

Foyer. Longueur. { Haut. $1^m,320$ / Bas. . $1^m,400$ } Largeur. { Haut. $1^m,130$ / Bas. . $1^m,020$ } Haut^r $1^m,770$

Tubes. Nombre, 250. Longueur, $3^m.200$.

Corps cylindrique. Diamètre intérieur, $1^m,50$. Epaisseur des tôles, $0^m,013$

Surface de chauffe. { Foyer. . . $9^{m2},69$ / Tubes. . . $115^{m2},55$ / Total. . . $125^{m2},24$ } . . . Numéro du timbre, 7 at.

Cylindres. . . . . . { Diamètre. . . . . . . $0^m,460$ / Course des pistons. . $0^m,68$ / Inclinaison. . . . . . 7° }

Longueur des bielles motrices. . . . . . . $1^m,800$

Diamètre des six roues (au roulement). $1^m,440$

Ecartement des essieux. { Avant. . . . $2^m,20$ / Arrière. . . $2^m,50$ (derrière la boîte à feu). / Total. . . . $4^m,70$ }

	POIDS SUR LES RAILS.	
	Machine non garnie.	Machine garnie d'eau et de coke.
Roues d'avant.	11.955 kilog.	12.840 kilog.
du milieu (motrices). . .	10.280	12.800
d'arrière.	7.110	7.800
	29.445	33.340

(1) Ces machines remorqueront, même sur les rampes de 0,005, 300 à 350 tonnes-utiles. Le matériel de transport destiné au même service vient d'être également l'objet d'une amélioration très-importante : les grands wagons nouvellement construits pour le transport des charbons portent un chargement de 10 tonnes sur deux essieux. Le réseau du Nord terminé, Paris sera rattaché, par des lignes à pente maximum de 0,003, aux grands centres de la production houillère du Nord, c'est-à-dire aux bassins d'Anzin, de Charleroi et de Mons. Avec de semblables conditions de débouché, de tracé, de matériel,

En augmentant ainsi le diamètre, et en admettant à l'exemple de l'Allemagne et de l'Angleterre des pressions normales très-élevées, 7 à 8 atmosphères effectives, on se trouverait bientôt arrêté par l'impossibilité de satisfaire aux conditions imposées par l'administration dans l'intérêt de la sécurité publique; pour l'épaisseur de la tôle, les locomotives sont déjà en France l'objet d'une tolérance parfaitement motivée d'ailleurs, mais de nouveaux tempéraments ne tarderont sans doute pas à être réclamés, et il y aura lieu d'examiner jusqu'à quel point ils pourraient se concilier avec les exigences de la sécurité. Pour les nouvelles machines du Nord, l'épaisseur, réglementaire maximum de la paroi cylindrique devrait être de $19^{mm},3$; la tolérance de 1/3 accordée dans ce cas la réduit à 15 millimètres, chiffre inférieur au maximum absolu (15 mill.). Cette épaisseur a donc pu être admise. Limites corrélatives du diamètre et de la pression.

Les dispositions en vigueur en France ont servi de type à la plupart des règlements de police promulgués dans d'autres pays, mais les modifications qui y ont été introduites ont généralement pour effet de laisser plus de latitude aux constructeurs. En Autriche, l'expression réglementaire de l'épaisseur des parois cylindrique est : Dispositions réglementaires en Autriche et en Belgique. 1° *Épaisseur.*

$e = 0,0018\ (n-2)d + 0,003$ tant que n est $< 6\frac{1}{2}$ (1),
$e = 0,0018\ (n-2)\,d$ quand n est $> 6\frac{1}{2}$.

(au lieu de $e = 0,0018\ (n-1)\ d + 0,003$, valeur fixée en France par l'ordonnance de 1843).

---

le trafic des charbons pourra prendre sur la ligne du Nord un développement énorme, avant d'arriver à l'encombrement du tronc commun, qui a seulement 67 kilomètres de longueur (de Paris à Creil). Jamais la navigation n'avait vu s'organiser sur les chemins de fer une concurrence aussi menaçante, aussi puissamment constituée.

(1) e et d sont exprimés en mètres, n est la pression *absolue* en atmosphères.

Le maximum est, en Autriche : 9 pour n, et $0^m,0142$ pour e. L'épaisseur réglementaire de la tôle serait, pour la *Bavaria*, $0^m,020$. Il a donc fallu, pour que le maximum ne fût pas dépassé, admettre comme en France une tolérance d'un tiers, mais elle s'applique à une épaisseur réglementaire déjà plus petite dans le rapport de 7 à 8. Et avec cette épaisseur maximum de $0^m,0142$, la tension sous la pression normale de 9 atm. s'élève à $4^k,66$ par millimètre quarré.

En Belgique, la formule des épaisseurs est la même qu'en France. Le maximum est de 12 millimètres seulement (arrêté royal du 15 novembre 1836), mais il ne s'applique pas, bien entendu, aux parois planes des chaudières tubulaires.

Nécessité d'un maximum pour l'épaisseur des parois cylindriques.

Les motifs qui ont conduit à fixer une limite à l'épaisseur sont moins impérieux, sans doute, pour les locomotives que pour les chaudières fixes ; la tôle n'y étant pas en contact avec la flamme, sa température ne peut dépasser celle de l'eau. Il serait facile d'ailleurs d'obtenir couramment des épaisseurs plus grandes que le maximum (15 millimètres), sans nuire à la qualité de la tôle. Avec de bon fer et des marteaux assez puissants, on peut compter encore au delà de ce point sur une bonne soudure, et sur la proportionnalité très-approchée de la résistance à l'épaisseur ; celle-ci s'élève à 19 millimètres pour une partie des tôles employées par Stephenson dans la construction des ponts tubulaires. L'épaisseur ne constitue par elle-même ni une difficulté de fabrication ni un obstacle à la qualité, et sous ce double rapport, il est indifférent, dans certaines limites, que les dimensions varient à volume égal. Les feuilles qui entrent dans la construction des chaudières de locomotives n'ont besoin d'être ni très-longues ni très-larges, et on pourrait par suite leur donner

de grandes épaisseurs; mais alors une seule ligne de rivets serait insuffisante, la largeur des recouvrements ou des couvre-joints serait accrue d'autant; en un mot, le mode d'assemblage serait plus compliqué et plus dispendieux. D'ailleurs si on relevait le maximum de l'épaisseur pour le corps cylindrique et par suite le maximum de la pression, il faudrait augmenter corrélativement les épaisseurs du système intérieur, et celles-ci sont déjà bien près d'être excessives, quelle que soit la disposition des armatures, pour des feuilles soumises à l'action immédiate de la flamme; l'utilité de la limite réglementaire peut donc être contestée en ce qui concerne le corps cylindrique, mais elle est évidente en ce qui touche le système intérieur; et c'est nécessairement au premier qu'elle s'applique, parce qu'il présente seul des conditions uniformes et bien définies.

La *Bavaria* n'eût pas été admise, en France, à l'épreuve pour 9 atmosphères, parce que l'épaisseur réglementaire $0^m,026$, réduite à $0^m,0174$ par la tolérance de 1/3, dépasserait notablement le maximum; l'Allemagne et l'Angleterre entrent dans une voie, périlleuse peut-être, et dans laquelle il ne faut pas trop se hâter de les suivre : il faut attendre les résultats de cette expérience, avant de modifier en France un régime qui a donné à la sécurité des garanties presque complètes, sans gêner, jusqu'à présent, l'essor de l'industrie.

Les chaudières de locomotive sont essayées, en Autriche comme en France, avec une charge sur les soupapes, double de la charge en service régulier. En Belgique, la pression d'épreuve est égale seulement à 1 fois 1/2 la pression effective normale. Une semblable épreuve ne peut que dévoiler des malfaçons, des défauts très-graves : elle est tout à fait insignifiante au point de vue de la résistance du système. La vérification des *2° Pression d'épreuve.*

épaisseurs, de la qualité du métal, de la disposition des armatures, constitue alors la seule garantie.

L'ingénieuse disposition imaginée par MM. Lemonnier et Vallée (1), et qui assure une large issue à la vapeur dès que la limite réglementaire de la pression est atteinte, vient du reste atténuer les craintes qu'eût fait naître à juste titre l'application des timbres élevés aux chaudières d'un grand diamètre. Ce mécanisme fort simple permet d'augmenter en toute sûreté de 1 au moins le n° du timbre, sans que le maximum réel de la pression soit plus élevé.

Chaudière de Kessler.

Kessler, constructeur à Carlsruhe, a cherché à se soustraire à la nécessité d'exagérer ou la longueur, ou le diamètre du corps de la chaudière, en le formant de deux cylindres superposés, l'un de $0^m,93$, l'autre de $0^m,65$ de diamètre, et qui se pénètrent de $0^m,20$; la corde commune a $0^m,56$, et la hauteur totale $1^m,38$. Le cylindre inférieur est entièrement garni de tubes; l'autre est occupé presque complétement par la vapeur. Le foyer, muni d'un bouilleur longitudinal, a $0^m,96$ de large, $1^m,20$ de long, et $1^m,45$ de hauteur dans œuvre. Les tubes, au nombre de 180, ont $0^m,041$ de diamètre, et $2^m,84$ de long. Le constructeur a pu ainsi obtenir une surface de chauffe considérable (foyer : $7^{m^2},56$, tubes : $66^{m^2},13$), donner à la chaudière une faible largeur, éviter les grands rayons de courbure et les armatures qu'ils nécessitent, réserver à la vapeur un grand espace favorable à son asséchement, et ne pas dépasser une limite très-restreinte ($3^m,65$) pour l'écartement des essieux extrêmes, sans tomber dans l'inconvénient, qui enfin n'est plus contesté maintenant, de la position en porte-à-faux de la boîte à feu. Une machine de ce mo-

(1) Voir page 337 de ce volume.

dèle, pesant 21 tonnes, fonctionne depuis plus d'un an, d'une manière satisfaisante, sur le chemin du Palatinat. Cette disposition peut être appliquée avantageusement aux chemins à petites courbes et à fortes rampes, qui exigent des chaudières à la fois très-courtes et très-puissantes; la forme elliptique est tout à fait insuffisante, l'excentricité étant nécessairement très-faible. La forme proposée par M. Kessler exige des tirants à la jonction des deux cylindres, mais ils sont courts et placés en dehors de l'espace encombré par les tubes. Il ne serait pas prudent cependant de soumettre à une très-forte pression une chaudière dans laquelle la tendance au changement de figure est aussi prononcée.

Cette forme n'aurait pu d'ailleurs être appliquée utilement à des machines aussi puissantes que devaient l'être celles du Semmering : elle n'aurait pas suffi pour rendre acceptable le principe de la *Vindobona*, dont elle aurait augmenté encore la hauteur, déjà trop grande.

Indications de la commission du concours.

Le gouvernement autrichien a invité la commission du concours à indiquer les points sur lesquels son opinion pouvait être fixée par le long examen auquel elle s'était livrée. Voici les conclusions auxquelles la commission s'est arrêtée (1), sans prétendre d'ailleurs tracer un programme complet :

1° Le maximum (7 tonnes) de la pression exercée par les roues doit être maintenu : il serait même utile qu'on pût le réduire ;

2° Il importe que toutes les roues de la machine, et même celles du tender, soient rendues adhérentes ;

3° Il est à désirer qu'on parvienne à fixer *toutes* les roues à des trains mobiles, sans cependant modifier notablement la disposition du mécanisme ;

(1) *Voir* le travail de M. Ghega, intitulé : *Quadro dei, etc... e dei risultamenti delle corse di prova sulla strada ferrata del Semmering*, seconda edizione. Vienne, 1852.

4° Ainsi, on doit surtout s'attacher à ne pas multiplier, comme dans la *Seraing* et la *Neustadt*, le nombre des cylindres;

5° Il n'y a pas lieu d'adopter deux types différents, l'un pour le service des voyageurs, l'autre pour le service des marchandises;

6° Toutes les machines devront être pourvues d'un appareil qui permette d'appliquer largement la détente;

7° Il convient de donner aux roues un diamètre de 1^{m},10 environ, avec une conicité de 1/7;

8° Il suffit pour la sécurité qu'une seule paire de roues de la machine soit pourvue de freins.

Différence essentielle entre une machine à quatre cylindres et deux machines distinctes.

L'objection élevée par la commission contre les machines à quatre cylindres paraît peu sérieuse. On reproche à cette combinaison d'introduire de l'irrégularité dans l'application du travail moteur, d'être à peu près l'équivalent de l'attelage de deux machines. Mais si l'emploi de deux machines présente quelques inconvénients, c'est parce qu'il n'y a plus d'unité dans leur conduite, et non par suite de l'indépendance de marche des deux systèmes de pistons conjugués. L'objection n'a quelque valeur qu'au point de vue du démarrage, et encore est-elle très-secondaire.

En somme, si le concours de 1851 n'a pas produit de résultats très-saillants, s'il n'est pas destiné, comme celui de 1829, à faire époque dans l'histoire des chemins de fer, il met du moins dès à présent à la disposition des ingénieurs, des machines qui répondent aux nécessités du moment, et qui renferment sans doute en germe les principes d'une solution tout à fait pratique de ce grand problème : la traversée du Semmering. Qu'on se reporte un peu en arrière, qu'on songe à la fécondité de ce résultat, chimérique il y a quelques années, acquis aujourd'hui, et on reconnaîtra que l'industrie des chemins de fer est vraiment privilégiée, que jamais il n'a été donné à aucune autre d'accomplir des progrès aussi rapides.

Voie.

Le rail, américain, est représenté (Pl. VI, *fig.* 3), à

l'échelle de 1/2. Il est posé sur traverses et fixé par des vis à bois dont les têtes s'appliquent exactement sur les bords du patin. Ces vis remplacent avantageusement les crampons barbelés, qui rendaient l'entretien difficile et dispendieux. Les traverses sont elles-mêmes reliées par des longrines, avec lesquelles elles sont assemblées au moyen d'entailles et d'équerres vissées *e*, *e* (*fig.* 4 et 5). On a donné, au sabottage, une inclinaison d'un seizième, égale à celle des jantes.

Modifications de la pose dans les courbes.

RAYONS.	JEU de la voie.	SUR-ÉLÉVATION.
mét.	mét.	mét.
316	0,029	0,074
285	0,032	0,082
253	0,037	0,092
221	0,041	0,105
190	0,047	0,122

Autres exemples : 1° Chemin wurtembergeois. *Traversées des Alpes-Rudes.*

J'ai insisté sur les deux exemples les plus saillants de la facilité avec laquelle les locomotives se prêtent aux conditions de tracé les plus difficiles. Il est inutile de s'arrêter à d'autres exemples, qui ne conduiraient à aucune conséquence nouvelle. Celui qu'offre le chemin wurtembergeois (Heilbronn à Friedrichshafen) est trop remarquable cependant pour n'en pas dire un mot. La rampe de *Geislingen* a, sur $5^k,15$ de longueur, une inclinaison de 0,0222, combinée avec des courbes de 272 mètres. Le service s'opère depuis deux ans sur cette rampe avec une grande régularité. Voici les principaux éléments des machines à six roues couplées affectées à cette section :

Longueur des tubes		$3^m,46$
Diamètre des roues		$1^m,22$
Surface de chauffe		$92^{m^2},00$
Pistons.	Diamètre	$0^m,432$
	Course	$0^m,61$
Poids (*garnie*)		34 t. 1/2

Une semblable machine remorque sur la rampe, à la vitesse de 15k à 15k,5, une charge brute de 100 à 102 tonnes, non compris le poids du tender.

2° Chemins piémontais. *Passage de l'Apennin.*

Le Piémont rencontre, dès son début dans la construction des chemins de fer, des difficultés plus grandes encore que celles dont les divers États de l'Allemagne méridionale ont dû triompher. La traversée de l'Apennin forme une suite non interrompue de travaux d'art et de terrassement, parmi lesquels on remarque un souterrain de 3.218 mètres, un viaduc de 30 mètres de hauteur, un pont de 40 mètres d'ouverture, un remblai de 30 mètres de hauteur, etc., et il a fallu admettre (près de Giovi) une inclinaison moyenne de 0,0303 sur 5k,62 de longueur. La ligne de Turin à Gênes est exploitée jusqu'à Arquata; les travaux d'Arquata à Gênes sont poussés avec une grande activité, et bientôt le service sera organisé sur cette section, plus remarquable et plus intéressante encore par la hardiesse du tracé au point de vue de l'exploitation, que par ses travaux gigantesques.

III. APPLICATIONS ET CONCLUSION.

Les résultats obtenus en Allemagne et notamment au Semmering permettent de poser dès à présent ce principe : les locomotives peuvent faire un service économique et régulier sur des rampes de 0,025, d'une longueur en quelque sorte indéfinie, combinées avec des courbes de 285 mètres de rayon.

Ce fait a certainement une grande valeur, mais ce serait exagérer sa portée réelle que de le considérer comme étant de nature à modifier, en général, les conditions essentielles du tracé des chemins de fer.

Limite à partir de laquelle la réduction des inclinaisons a moins d'importance.

Les rampes se divisent en deux catégories : 1° celles dont l'inclinaison et les rayons de courbure sont tels, que les machines ordinaires peuvent habituellement les

ranchir avec leur charge normale; 2° celles qui exigent ou des machines de renfort ou des machines spéciales. Il y a en général un grand intérêt à ne pas dépasser la limite qui les sépare, à ne pas rompre, pour ainsi dire, l'uniformité du tracé. Mais quand cette limite doit nécessairement être franchie, un certain accroissement du rayon de courbure et une réduction de quelques millièmes dans l'inclinaison n'ont plus la même importance. Un semblable perfectionnement du tracé serait souvent illusoire; il profiterait médiocrement à l'exploitation, et il serait généralement très-onéreux pour la construction.

La limite d'inclinaison à partir de laquelle les longues rampes deviennent à peu près impraticables aux machines ordinaires est peu élevée, surtout pour les chemins à grand trafic, sur lesquels les trains sont lourds, l'excès de puissance des machines sur niveau peu considérable, et une grande régularité dans le service absolument nécessaire (1). Sur le chemin de Paris à Lyon, par exemple, les deux rampes de 0,008 entre Verrey et Dijon, longues l'une de 9 kilom., l'autre de 14 kilom. 1/2, exigent des machines spéciales pour les voyageurs et des machines de renfort pour les marchandises. Dès lors une inclinaison de quelques millièmes de plus n'aurait pas modifié gravement les conditions de l'exploitation. Avec des machines plus puissantes, à roues un peu plus petites, et pour le service des voyageurs, à six roues

(1) Il est rare que la rampe de 0,008 du chemin d'Orléans à Étampes puisse être franchie sans renfort, malgré sa faible longueur et malgré la prime de 0f,75 attribuée aux mécaniciens qui ne recourent pas à la machine de réserve. La position de cette rampe près d'une station principale, où la présence d'une machine en feu serait dans tous les cas indispensable, la rend d'ailleurs moins onéreuse.

couplées au lieu de quatre, il n'y aurait eu d'autre changement qu'une réduction correspondante de la vitesse sur la rampe. Cette remarque est faite du reste simplement à titre d'exemple et non comme une critique, même très-hasardée, du tracé adopté; la direction générale une fois imposée, le niveau de l'entrée en souterrain sur le versant sud était sans doute fixé par le brusque redressement du profil du sol, qui s'élève à 196^{m},50 sur 1 kilomètre de longueur, c'est-à-dire avec une pente moyenne de 1/5 (Pl. VI, *fig.* 9).

On ne peut plier les locomotives à des exigences exceptionnelles du terrain qu'en sacrifiant une de leurs propriétés caractéristiques, la vitesse. La vitesse est interdite aux machines appropriées aux rampes très-roides, par la petitesse de leurs roues motrices; aux machines appropriées aux courbes de très-petit rayon, par la mobilité de leur avant-train; et par les deux causes réunies, aux machines qui doivent, comme celles du Semmering, remplir à la fois les deux conditions. Mais l'inaptitude des machines de ce genre pour les grandes vitesses est indifférente, car il n'y a aucun inconvénient à affecter au service de quelques sections spéciales des machines particulières, dont la puissance et le mode de construction soient appropriées aux rampes et aux courbes du tronçon qu'elles desservent exclusivement. Cette combinaison est même préférable à l'emploi de machines ordinaires de renfort, dès que l'étendue sur laquelle un surcroît de puissance est nécessaire atteint quelques kilomètres.

Équivalence des nouvelles machines et des wagons sous le rapport des courbes.

Sous leur forme habituelle, les locomotives sont bien plus rebelles que les wagons aux brusques inflexions, en plan, du tracé. Les machines à vitesse moyenne, qui ont presque toujours les roues indépendantes et l'essieu moteur au milieu, sont assez accommodantes sous ce

rapport, les deux essieux antérieurs étant seuls assujettis à un parallélisme absolu. Mais les machines à grande vitesse, et celles à vitesse réduite, sont beaucoup plus exigeantes. Pour les premières, on reconnaît aujourd'hui qu'on donne à la sécurité de précieuses garanties en prenant pour essieu moteur celui d'arrière, et en le plaçant au delà de la boîte à feu. Cette condition, jointe à celle d'une grande longueur imposée par la puissance considérable et le diamètre nécessairement restreint de la chaudière dans les machines à grande vitesse, conduit à un très-grand écartement des essieux rigoureusement parallèles. L'accouplement, et la puissance qu'exige la grandeur de l'effort de traction à développer, conduisent à une conséquence analogue pour les machines à petite vitesse. Toutefois la latitude plus grande pour le diamètre, et les inconvénients moins graves dans ce cas de la boîte à feu placée en porte-à-faux, permettent de donner, à égalité de puissance, un moindre écartement aux essieux extrêmes.

Les constructeurs de la *Seraing* et de la *Neustadt* ont réussi à placer des locomotives d'une puissance énorme, à peu près dans les mêmes conditions à l'égard des courbes, que la plupart des wagons à quatre roues (1), tout en utilisant complétement leur poids pour l'adhérence (2). La *Bavaria* remplit aussi à peu près la même

(1) L'écartement des essieux est même (pages 385 et 386) moindre que dans les wagons ordinaires : mais ceux-ci admettent un jeu des boîtes dans les plaques de garde, qu'on peut porter à $0^m,005$ ou $0^m,006$ de part et d'autre de la position moyenne, sans inconvénient pour la marche à grande vitesse.

(2) On sait que MM. Nicklès et Cassel ont indiqué récemment un moyen d'obtenir d'une seule paire de roues motrices et sans surcharge une adhérence qui devait être, d'après eux, presque indéfinie. Le principe consiste à transformer, par l'action d'un courant, la partie de la jante voisine du rail en un

Association ordinairement nécessaire des fortes pentes et des courbes de petit rayon.

condition. Cette propriété est d'autant plus précieuse que les machines qui conviennent aux rampes très-roides doivent généralement aussi convenir aux courbes de petit rayon. Les courbes sont en effet dans plusieurs cas le complément nécessaire des rampes; c'est en combinant ensemble, dans une juste mesure, les inflexions en plan et en profil qu'on peut, sans exagérer ni les uns ni les autres, prolonger les chemins de fer en dépit des difficultés du terrain. Associées à des rampes prononcées, les courbes sont dans certaines limites à peu près sans inconvénient, une forte inclinaison exigeant déjà par elle-même des machines impropres aux grandes vitesses et qui peuvent dès lors — l'exemple du Semmering le prouve — être adaptées en même temps aux courbes de petit rayon sans nouveaux sacrifices et sans complication excessive. Les courbes de petit rayon sont donc presque exemptes d'inconvénients, précisément dans les cas où elles sont souvent tout à fait nécessaires. Non-seulement elles ne doivent, comme les rampes très-longues et très-roides, constituer que de rares exceptions, mais encore ces deux exceptions doivent

---

aimant puissant, et à développer ainsi entre la roue et le rail une pression très-considérable due à l'attraction magnétique. Les expériences faites aux ateliers du chemin de Lyon n'ont pas confirmé les espérances que les auteurs fondaient sur cette ingénieuse idée. L'attraction est faible, même quand la roue, influencée par une pile très-puissante, est immobile : elle décroît très-rapidement quand la roue tourne, et devient presque nulle pour la vitesse de rotation normale. La nécessité de suspendre la bobine qui entoure la jante, de telle sorte qu'elle rase le rail de très-près, constituerait d'ailleurs un danger sérieux. Il ne s'agit là, du reste, que d'une difficulté d'ajustement, facile sans doute à surmonter. Mais le principe lui-même ne paraît nullement pratique, au moins dans l'état actuel des ressources que la science peut mettre à la disposition de l'industrie.

être réunies, pour vaincre les difficultés en se servant mutuellement de tempérament.

Limite absolue des rayons de courbure sur les grandes lignes.

En cessant ainsi de fixer pour leur compte aux rayons de courbure une limite plus élevée que les wagons, les locomotives vont alors de pair, sous ce rapport, avec le système atmosphérique. La disposition qui caractérise la *Seraing* permettrait même de rapprocher notablement les essieux parallèles et par suite de réduire encore le rayon des courbes praticables pour cette machine, sans diminuer le diamètre des roues; de sorte que les rôles seraient alors intervertis, le rayon minimum serait fixé non plus par la machine, mais par les wagons. Mais il y a pour les courbes une limite absolue, celle au-dessous de laquelle elles refuseraient de recevoir les wagons du système anglais. Ce qui est possible pour les machines ne l'est pas pour le matériel de transport. Il doit nécessairement franchir toute la ligne, et il faut dès lors qu'il soit construit en vue des conditions normales du tracé, des exigences de la vitesse, et non en vue de quelques exceptions locales, auxquelles il ne pourrait se prêter sans cesser de remplir les conditions essentielles de sa destination.

Exclusion des courbes très-multipliées, indépendamment de la construction du matériel.

Il y a plus : quand on réussirait à approprier tout le matériel mobile, machines et wagons, à la circulation dans les courbes de petit rayon et sur les rampes très-roides; quand on y parviendrait sans réduire la vitesse dont ce matériel est susceptible en alignement et sur niveau, sans diminuer sa stabilité, sans augmenter la résistance à la traction, de graves motifs s'opposeraient à ce qu'on usât de cette faculté dans l'établissement des chemins de fer. Tout principe a ses conséquences, auxquelles on ne peut se soustraire impunément. A moins d'une transformation complète et sans doute ima-

ginaire dans les conditions des transports sur les chemins de fer, la grandeur et la vitesse des masses en mouvement excluent nécessairement les courbes roides et multipliées. Quelles que soient la perfection du système de signaux et la vigilance du personnel, jamais la sécurité ne sera aussi complète en courbe que sur de longs alignements, où le mécanicien embrasse de l'œil une grande étendue de voie. Il n'y a pas, quoiqu'on fasse, de garantie qui vaille celle-là. La tendance n'est assurément pas de réduire la masse et la vitesse des trains : on ne peut donc — et aujourd'hui moins que jamais — songer à multiplier les inflexions du tracé. On peut désormais, et c'est déjà un grand point, admettre des courbes de petit rayon qui, combinées avec de grandes inclinaisons excluant par elles-mêmes la vitesse, permettront de franchir des obstacles insurmontables sans cela; mais, pour être moins absolues, pour admettre des exceptions, les conditions actuelles du tracé n'en subsisteront pas moins pour les lignes importantes.

Utilité secondaire d'un système de *wagons* propres aux courbes de petit rayon : 1° matériel américain.

Les dangers inséparables d'un tracé très-contourné pour les lignes de grand trafic ne permettent donc d'attacher qu'une importance secondaire à la solution d'un problème qui a été l'objet de travaux d'ailleurs très-ingénieux, la construction d'un matériel admettant des courbes de rayons quelconques. Dès que les petites courbes et les pentes rapides constituent seulement des points singuliers et très-peu nombreux dans l'ensemble du tracé, le matériel *de transport* doit avant tout convenir au parcours des alignements en palier, c'est-à-dire au parcours à grande vitesse. Le revirement déjà signalé dans l'opinion des ingénieurs bavarois sur le matériel américain est très-significatif, parce qu'il est le résultat d'une longue pratique. Ce n'est pas seule-

ment dans les imperfections de détail de ce matériel qu'il faut chercher l'origine de la réaction qui s'est opérée contre lui : la cause de cette réaction est plus générale; elle tient à une appréciation plus saine des conditions que doit remplir le tracé d'un chemin de fer à grande vitesse indépendamment du mode de construction du matériel. Loin de conduire les ingénieurs de la ligne saxo-bavaroise à regretter l'étendue des sacrifices qu'ils ont faits à une certaine perfection relative du tracé dans la section du Nord, l'expérience du service n'a fait qu'établir plus évidemment à leurs yeux l'importance d'un tracé favorable à l'exploitation, toutes les fois que cet avantage n'est pas acheté trop chèrement. Aussi s'est-on attaché, dans la section méridionale encore inachevée (celle d'Augsbourg à Lindau), à ne pas dépasser, pour les pentes et les courbes, les limites de 0,010 et 400 mètres, limites dans lesquelles la configuration du sol permettait de se renfermer sans exagérer les dépenses.

Il est facile dès lors de se rendre compte des motifs qui ont dû s'opposer à l'application du système articulé. On ne peut à coup sûr mettre son insuccès sur le compte de l'indifférence à laquelle les plus utiles inventions doivent, dit-on, payer en France un long tribut avant d'être comprises et acceptées. Le système articulé a un premier tort : il est incomplet, il résout le problème seulement pour le matériel de transport et refuse aux locomotives l'adhérence qu'exigent impérieusement les transports à petite vitesse. Cette imperfection n'est pas irrémissible sans doute : la disposition appliquée aux machines *Seraing* et *Neustadt* et le rapprochement convenable des essieux dans chaque train mobile trancheraient même dès à présent cette difficulté, mais en réduisant encore la vitesse, car de semblables machines 2° Système articulé.

seraient condamnées par la petitesse de leurs roues à une marche fort lente (1). Mais le matériel articulé a le tort plus grave de n'avoir pour raison d'être que l'exception et de se placer en dehors de la règle.

Perfectionnement apporté à ce matériel.

Ce grave inconvénient est notablement atténué, il est vrai par la nouvelle solution d'une si ingénieuse simplicité que MM. Arnoux père et fils ont récemment substituée à l'ancienne, et qui doit ramener l'attention sur le principe de la convergence (2). Ce perfectionnement qui rapproche le matériel articulé du matériel ordinaire, sans porter aucune atteinte à sa propriété caractéristique, la position des essieux constamment normale à l'axe de la voie, a sans doute une valeur

(1) La petitesse des roues exagérerait d'ailleurs encore les glissements, dont l'amplitude est en raison inverse du rayon pour les jantes cylindriques. Il faudrait pour supprimer le glissement une conicité exagérée. L'indépendance des roues et des essieux serait donc plus nécessaire encore pour les machines que pour les wagons, mais elle est difficile à réaliser simplement.

(2) Cette solution, fondée comme la première sur l'équidistance des essieux d'un train, consiste à lier chaque essieu d'une part à la flèche, de l'autre au timon (ou barre d'attelage) au moyen de quatre bielles égales *b*, *b* formant un losange articulé (Pl VI, *fig.* 10 et 11). Deux des sommets de ce losange sont fixés à deux douilles alésées *d*, *d* qui peuvent glisser sur deux portées de l'essieu : les deux autres sont fixés invariablement, l'un à la flèche, l'autre au timon. Quel que soit l'angle formé par ces deux droites, l'essieu est ainsi dirigé constamment suivant la bissectrice de cet angle et par suite vers le centre de l'arc dont la flèche et le timon sont deux cordes égales. La supériorité de cette disposition sur l'ancienne est manifeste : elle supprime les deux systèmes de chaînes de connexion : elle simplifie la formation et la décomposition des trains : elle restitue aux wagons leur symétrie et par suite la faculté de reculer instantanément sans que les essieux cessent d'être dirigés : enfin elle fait disparaître l'inconvénient de la convergence prématurée, inconvénient léger du reste, puisque les essieux d'un wagon ne commençaient à converger, dans l'ancien système, qu'à l'instant où le wagon précédent entrait en courbe.

réelle. Un wagon de ce système mis en expérience sur le chemin de fer de Lyon, s'y comporte convenablement; tout indique donc que quelques wagons de ce genre peuvent sans inconvénient être admis dans la composition des trains formés de wagons ordinaires.

Avenir de ce système.

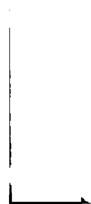
Le jour où ce résultat sera définitivement acquis au système articulé, il pourra entrevoir des chances sérieuses d'application, mais toujours sur une échelle restreinte. Quand un tracé composé essentiellement de longs alignements ne serait pas une condition de rigueur pour les chemins de fer du premier ordre, indépendamment du mode de construction du matériel, le système articulé serait loin encore, même sous sa forme nouvelle, de répondre aux exigences du service à grande vitesse et par trains formés d'un grand nombre de wagons : l'absence des plaques de garde, et la rigidité ou l'élasticité très-faible de l'attelage, suffiraient pour lui interdire absolument les lignes principales : cette exclusion s'étend aussi, dès lors, aux chemins qui n'ont par eux-mêmes qu'une importance secondaire, mais pour lesquels la faculté de livrer passage au matériel des grandes lignes est une garantie de succès ou une condition d'existence. Ce n'est pas au moment où les obstacles naturels s'aplanissent, où les tronçons d'abord séparés peuvent espérer faire un jour partie du réseau et participer au mouvement général, qu'il serait prudent d'engager l'avenir et de se placer pour toujours en dehors des voies de communication principales.

C'est compromettre le succès d'un perfectionnement industriel que de chercher à étendre, au delà de ses limites réelles, le champ de ses applications. Le système atmosphérique serait peut-être moins délaissé si ses partisans n'avaient pas méconnu aveuglément les véri-

tables conditions de son emploi : l'expédient très-insuffisant, mais cependant utile, indiqué par M. Laignel, s'était de même fourvoyé d'abord en prétendant s'introduire sur les chemins importants, à la faveur de la substitution aux grandes courbes d'une série de très-petites courbes raccordant de courts alignements inscrits dans les grands arcs. En présentant des perfectionnements de ce genre sous une forme trop ambitieuse, évidemment inacceptable, on masque leur valeur réelle, et les applications plus modestes qu'elles peuvent recevoir sont perdues de vue. Aujourd'hui, l'artifice imaginé par M. Laignel est classé, et on l'utilise.

Il en sera de même sans doute, toute proportion gardée, pour le système articulé. Le problème qu'il résout partiellement n'a pas, je le répète, toute l'importance pratique qu'on est tenté de lui attribuer au premier abord. L'avenir est pour lui dans l'établissement des lignes secondaires, pour qui l'économie est une condition de rigueur, et auxquelles leur situation interdit toute prétention à faire un jour partie d'une ligne principale. Dans les conditions actuelles, avec les énormes frais généraux qu'ils entraînent, les chemins de fer ne sont possibles que suivant les grands courants de la circulation. Le matériel articulé permettrait d'établir à peu de frais de nombreux affluents parcourus par des trains d'un petit nombre de wagons. A l'économie de la construction se joindrait un autre avantage propre au système, la lenteur de l'usure des bandages par suite de l'indépendance des roues. L'établissement ou la subvention de semblables affluents, pourvus d'un matériel léger, pourraient être dans beaucoup de circonstances une opération fructueuse pour les grandes lignes. La construction de *chemins de fer à bon marché* préoccupe depuis quelque temps l'administration : une question de

cette nature n'est guère susceptible d'une solution générale : mais s'il y a un principe qu'on puisse mettre à profit, c'est celui du système articulé, au moins dans tous les cas où la nature du trafic permettra de renoncer à la continuité du parcours, *de la ligne principale vers l'embranchement;* car le perfectionnement indiqué permet sans doute dès à présent de supprimer le transbordement dans l'autre sens.



NOTE

RELATIVE A L'EMPLOI DE LA VAPEUR D'EAU DANS CERTAINES OPÉRATIONS MÉTALLURGIQUES.

Par M. E. CUMENGE, ingénieur des mines.

La chimie et la métallurgie ont des principes communs, bien qu'elles diffèrent par leurs moyens d'action. La métallurgie, par cela même qu'elle est plutôt un art qu'une science, ne peut se servir que des réactifs peu nombreux qui réunissent les conditions nécessaires d'abondance et de bon marché ; l'ouvrier intervient par son travail dans les opérations métallurgiques, il modifie les réactions chimiques, il en fait naître qui ne se produiraient pas sans son concours, de telle sorte qu'avec quelques réactifs seulement la métallurgie est arrivée à produire les effets les plus variés. La science s'est appliquée à faire comprendre les phénomènes métallurgiques, mais son rôle doit-il se borner à cela ? La chimie ne peut-elle prétendre à aucune innovation dans un art qui repose sur les mêmes principes qu'elle ? Jusqu'à présent, il est vrai, le peu de succès qu'ont eu dans la métallurgie les innovations chimiques encourage peu à s'engager dans cette voie ; cependant, si l'on ne perd pas de vue les conditions nécessaires à toute méthode pour être praticable sur une grande échelle, je crois qu'il est possible d'ouvrir par la science de nouvelles voies à l'industrie des métaux.

Les agents employés pour la production des métaux se réduisent à un très-petit nombre de corps, que la nature But de cette note.

fournit en abondance. L'air atmosphérique, les combustibles, les gaz provenant de leur combustion et quelques fondants servent seuls à produire, avec l'aide des ouvriers et dans des appareils convenables, les phénomènes nombreux d'oxydation et de réduction par lesquels on doit passer avant de retirer les métaux purs des combinaisons complexes dans lesquelles la nature nous les offre engagés. Le but que je me propose est de faire voir comment on pourrait ajouter à la liste des réactifs métallurgiques un corps facile à produire, à peu de frais, la vapeur d'eau, et comment on arriverait à simplifier ou à perfectionner par son emploi les procédés actuellement en usage.

Je prendrai pour exemple la métallurgie de cuivre. Tout le monde connaît la méthode suivie dans le pays de Galles. Par son beau travail, notre savant professeur M. Leplay a rendu familières, à tous ceux qui s'occupent de métallurgie, les réactions complexes qui se passent dans la série d'opérations du traitement Gallois; il a analysé les causes de complication de la méthode, et fait voir comment la présence de l'arsenic et de l'antimoine oblige à passer par une série très-nombreuse de grillages : la difficulté devient très-considérable lorsque les proportions d'arsenic et d'antimoine augmentent un peu, et lorsque la quantité de ces matières nuisibles s'élève jusqu'à 30 p. 100, comme dans les cuivres gris de Mouzaïa, il devient à peu près impossible de faire de ces minerais l'objet d'un traitement spécial; on en est réduit à les faire passer en petite quantité dans le roulement général d'une grande usine.

Préoccupé de ces difficultés, mais en même temps pénétré des avantages que l'on pourrait tirer du traitement des minerais de Mouzaïa dans une usine du littoral de la Méditerranée, j'ai cherché à me rendre compte de

l'action qu'exerce sur eux la vapeur d'eau à une certaine température. Dans le courant de mes expériences, j'ai eu connaissance du travail de M. Regnault, inséré, en 1836, dans les *Annales de physique et de chimie*, et qui traite de l'action de la vapeur d'eau sur les sulfures métalliques; j'ai néanmoins persisté à faire connaître les résultats auxquels je suis arrivé, espérant que peut-être ces expériences entreprises, non à un point de vue scientifique, mais dans un but d'application directe à l'industrie, pourraient être de quelque utilité, maintenant que la question du départ complet de l'arsenic et de l'antimoine est à l'ordre du jour, que l'influence nuisible de ces métaux et l'insuffisance des méthodes actuelles sont généralement reconnues.

Action de la vapeur d'eau sur le cuivre gris de Mouzaïa.

Le minerai de Mouzaïa, qui m'a servi à mes expériences, a la composition suivante :

Cuivre	0,18
Fer	0,04
Antimoine et arsenic	0,28
Soufre	0,08
Fer carbonaté	0.37
Sulfate de baryte	0,03
	0,98

Après l'avoir broyé, je l'introduisais dans un tube de terre réfractaire placé lui-même dans un fourneau à réverbère; aux deux extrémités du tube étaient adaptés, au moyen de bouchons, deux tubes en verre : l'un d'eux servait à l'admission de la vapeur d'eau, l'autre au dégagement des produits du grillage. En chauffant le tube avec précaution et, autant que possible, par sa partie supérieure, afin d'éviter l'agglomération de la matière pulvérulente, on voit bientôt apparaître, dans le tube abducteur, un produit particulier entraîné par la vapeur d'eau et qui se condense avec elle; il est d'un jaune

rougeâtre, et renferme du soufre, de l'arsenic et de l'antimoine. Pour se rendre compte de sa production, il faut se reporter à l'action que l'eau exerce par chacun de ses éléments sur les différents corps constitutifs du minerai. Il est facile de constater la présence de l'hydrogène sulfuré dans le dégagement; c'est probablement cet hydrogène sulfuré qui agit sur les produits de l'oxydation de l'arsenic et de l'antimoine à l'état naissant, et forme, à la faveur de la vapeur d'eau en excès, le composé volatil rougeâtre dont j'ai parlé; au reste, la température modifie les produits qui se dégagent; ils varient aussi avec les diverses périodes de l'expérience; quelquefois il se dégage des hydrogènes arséniés et antimoniés, souvent de l'acide sulfureux; mais un fait constant est la production du corps volatil rougeâtre. La production de ce corps, si facilement entraîné dans le dégagement, me faisait espérer de pouvoir parvenir à chasser complétement l'arsenic et l'antimoine. Ce qui s'oppose à la réalisation de ce résultat, lorsque l'air atmosphérique opère le grillage, c'est la transformation en oxydes incomplétement volatils, la production d'arséniates et d'antimoniates et la reproduction de sulfures; mais avec la vapeur d'eau et à la basse température qui suffit pour la réaction, aucune de ces circonstances ne peut se réaliser, les corps nuisibles partent à l'état de combinaison hydrogénée, ou s'ils s'oxydent, ils se trouvent en présence d'hydrogène sulfuré qui les entraîne à l'état de combinaison.

J'ai eu en effet l'occasion de démontrer la réalité de cette hypothèse par une expérience postérieure à mes premières recherches; voici en quoi elle consiste : si l'on fait passer un courant d'hydrogène sulfuré et de vapeur d'eau sur de l'acide antimonique ou sur un oxyde inférieur d'antimoine chauffé au rouge

sombre, on parvient à le volatiliser complétement, et la combinaison rougeâtre apparaît comme dans l'expérience du cuivre gris.

Des expériences nombreuses, répétées sur le minerai de Mouzaïa, d'abord seul, puis mélangé de pyrites cuivreuses ou de pyrites de fer, sont venues confirmer mes prévisions. Pour le minerai seul, je n'ai pas pu parvenir à faire disparaître les dernières traces d'antimoine; mais les mélanges de ce minerai avec des pyrites n'ont pas donné de traces d'arsenic et d'antimoine, lorsque j'ai soumis les produits du grillage aux investigations que je décrirai plus tard, et qui en accusent des demi-milligrammes.

L'arsenic et l'antimoine sont complétement chassés.

La conclusion qu'on peut tirer de ces expériences est la suivante : « Il est possible de se débarrasser complétement de l'arsenic et de l'antimoine contenus dans un minerai ou dans une matte, en soumettant ces corps à l'action de la vapeur d'eau dans une enveloppe fermée, et en les chauffant tout au plus au rouge sombre, pourvu qu'ils contiennent une proportion de soufre capable de former une quantité d'hydrogène sulfuré plus que suffisante pour entraîner la totalité des corps nuisibles à l'état de combinaison hydratée. »

Avec le minerai de Mouzaïa, une proportion de 25 p. 100 de pyrite cuivreuse suffit amplement; la généralité des minerais de cuivre et la plupart des mattes, produites dans les traitements actuels, sont dans des conditions très-favorables au grillage par la vapeur d'eau.

Description de mon petit four de grillage.

Ces expériences, pour ainsi dire théoriques, ne peuvent fixer les idées par elles-mêmes sur la valeur du procédé; car il y a loin d'une expérience de laboratoire à un procédé métallurgique : elles m'ont cependant fait entrevoir la possibilité d'employer en grand un four de

grillage fondé sur les principes énoncés précédemment. Avant d'entreprendre des expériences sur une grande échelle, j'ai voulu réaliser, autant que possible, en petit les conditions de la pratique ; j'ai pour cela construit un petit four à réverbère, dont je donnerai la description, au moyen duquel j'ai pu griller à la fois 4 kilogrammes de minerai de Mouzaïa pulvérisé et mélangé de 25 p. 100 de pyrite cuivreuse.

La sole du four est un rectangle à pans coupés ; sa longueur, suivant l'axe, est de $0^m,60$, sa largeur de $0^m,35$. Elle communique à la chauffe par un rampant de $0^m,22$. La chauffe est un rectangle de même largeur que la sole ; sa dimension dans l'axe du four est de $0^m,22$. La hauteur du pont est $0^m,06$ au-dessus du niveau de la sole, et la distance entre le sommet du pont et la grille de $0^m,40$. La hauteur de la voûte est, près du pont, de $0^m,11$; elle s'abaisse progressivement jusqu'au rampant de sortie où elle n'a plus que $0^m,06$. La porte de chargement et de travail est située dans l'axe du four ; la cheminée se trouve immédiatement au-dessus de la porte, elle est simplement formée par un tuyau de tôle de 5 mètres de haut et de $0^m,10$ de diamètre. La porte de chargement du combustible est lutée pendant l'opération, et la quantité d'air, admise sous la grille, est réglée au moyen d'une ouverture pratiquée à la porte qui ferme le cendrier, et que l'on diminue à volonté ; enfin, une petite chaudière de 10 litres de capacité fournissait la vapeur d'eau qui était amenée dans le four par deux tuyaux métalliques débouchant de chaque côté du pont.

Remarques sur ses dimensions relatives. Je ferai quelques remarques pour justifier les dimensions relatives de l'appareil. La chauffe ne paraît pas en rapport avec la dimension de la sole, eu égard à la température peu élevée qu'il est nécessaire de produire ;

mais, voulant n'avoir à faire qu'un très-petit nombre de charges de combustible pendant l'opération, j'ai été conduit à admettre des dimensions de chauffe, qu'il ne faudrait pas prendre pour type dans un four ordinaire; d'un autre côté, me proposant de ne produire que des gaz réductifs et non oxydants, j'ai donné à la colonne de combustible une assez grande hauteur; je chargeais en outre la houille en très-petits fragments, et je ne laissais qu'une très-petite ouverture à la porte du cendrier.

En somme, après quelques tâtonnements, je suis arrivé à produire dans le four un courant gazeux non oxydant, et qui porte au rouge sombre le minerai uniformément étendu sur la sole, sur une épaisseur de 2 centimètres; la vapeur d'eau, projetée à la surface du minerai, exerce son action sur lui, et lorsque l'admission de l'air est bien réglée, on peut constater, comme dans l'expérience du tube fermé, la production du sulfure complexe sur lequel je fais reposer le succès de l'opération.

Travail et durée de l'élaboration d'une charge.

Le seul travail qu'on ait à faire est de renouveler, de temps en temps, les surfaces directement soumises à l'action de la vapeur; quant au temps qu'exigerait l'élaboration d'une charge dans un grand four, les résultats que j'ai observés ne peuvent pas fixer complétement les idées; cependant je crois que la durée du grillage n'excéderait pas de beaucoup celle des fours Gallois.

On peut chasser complétement les corps nuisibles en conservant une certaine proportion de soufre.

Quant au résultat, il serait de pouvoir chasser complétement l'arsenic et l'antimoine, en permettant de conserver, dans les produits du grillage, une certaine proportion de soufre nécessaire à la production de la matte, si l'on opère sur le minerai, et à l'affinage facile des cuivres noirs ferreux si c'est la matte que l'on grille.

J'ai constaté qu'on pouvait obtenir cet effet. Une

certaine quantité de minerai de Mouzaïa, grillé dans mon four avec 25 p. 100 de pyrite, a été réduite dans un creuset; j'employais un verre terreux comme fondant, afin de me placer dans les conditions les plus rapprochées de celles de la pratique; une lame de fer me servait d'agent réductif. J'ai obtenu un culot de cuivre noir analysé au bureau des essais de l'École des mines, et qui a la composition suivante :

Soufre.	0,02
Arsenic et antimoine.	0,0001
Fer.	0,09
Cuivre.	0,88
Nickel.	traces.
	0,99

Comme on le voit par cette analyse, un seul grillage dans un appareil nécessairement imparfait, a suffi cependant pour chasser presque totalement les matières nuisibles. Ce résultat me semble avoir une grande importance, si l'on réfléchit à la difficulté qu'on éprouve à l'obtenir par les procédés ordinaires, surtout pour un minerai renfermant plus d'antimoine que d'arsenic et une proportion de 28 p. 100 de ces deux matières.

Procédé d'analyse pour déterminer les petites proportions d'arsenic et d'antimoine.

Je crois devoir indiquer ici le procédé qui m'a servi à déterminer les petites quantités d'arsenic et d'antimoine. L'appareil de Marsh peut servir non-seulement à reconnaître la présence de ces corps, mais encore à en apprécier la proportion. Si l'on fait dissoudre des quantités d'acide arsénieux correspondantes à 1/2, 1, 2 jusqu'à 5 milligrammes d'arsenic et qu'on les entraîne par de l'oxyde de fer, on pourra, après avoir redissous le précipité dans l'acide sulfurique, et après avoir introduit la liqueur dans l'appareil de Marsh, constater les taches qui se produisent; l'on verra qu'elles diffé-

rent considérablement par leur intensité et la manière dont elles se forment. De sorte qu'avec un peu d'habitude on pourra former pour ainsi dire une échelle qui servira à déterminer par comparaison les quantités d'arsenic qui existent dans la matière soumise à l'analyse.

Ce procédé est délicat, mais il peut donner des résultats satisfaisants, en ayant soin de prendre les précautions convenables et d'opérer toujours dans les mêmes circonstances. Je crois utile de signaler ici un fait dont une série d'expériences entreprises au bureau des essais nous a fait voir toute l'importance; je veux parler de l'action du peroxyde de fer. On sait que la présence d'une petite quantité d'acide nitrique dans l'appareil de Marsh peut diminuer considérablement l'intensité des taches et même les empêcher de se produire; nous avons constaté que le peroxyde de fer avait une action analogue, quoique moins intense. Avec une grande quantité de peroxyde, 2 grammes par exemple, il devient impossible d'obtenir les taches correspondantes à 1 et même 2 milligrammes d'arsenic. La quantité la plus convenable pour les limites de 1/2 à 5 milligrammes est de 25 centigrammes de fer. L'alumine n'a pas l'inconvénient de retarder ou de diminuer le dégagement d'hydrogène arsénié, mais peut-être entraîne-t-elle moins bien l'arsenic.

Quoique j'aie posé les limites de 1/2 à 5 milligrammes d'arsenic comme étant les plus commodes, on comprend que ce mode d'essai puisse accuser dans les cuivres des quantités de métaux nuisibles inférieures ou supérieures à ces limites; car en prenant une plus ou moins grande quantité de cuivre, il est toujours possible de ramener à ces limites la quantité d'arsenic que l'on a à reconnaître.

Je n'ai parlé que de ce corps, mais ce que j'en ai dit

s'applique également à l'antimoine dont les taches ne diffèrent que par une couleur un peu rougeâtre et une moins grande volatilité.

Possibilité d'employer en grand le grillage par la vapeur d'eau ; forme des appareils.

Je crois qu'on peut espérer de réaliser les effets que j'ai pu produire dans un four de faibles dimensions, en employant des fours analogues à ceux qui sont actuellement en usage ; le four à réverbère serait l'appareil le plus commode à employer ; et je me réserve de publier plus tard les résultats qu'aura donné un four de grillage dont j'ai calculé la forme et les dimensions de manière à pouvoir griller en douze heures 500 kilogrammes de cuivre gris. On pourrait aussi employer un four à foyer placé au-dessoue de la sole où la flamme chaufferait les parois sans pénétrer dans l'intérieur et dont je donnerai aussi la description.

Si je m'étends ainsi sur les formes probables ou possibles d'un four de grillage construit dans le but de chasser la totalité de l'arsenic et de l'antimoine au moyen de la vapeur d'eau, c'est que je crois de la plus haute importance d'arriver à ce résultat : la valeur marchande des qualités de cuivre qui ne renferment pas de traces de ces corps, leur présence dans la plupart des cuivres anglais, les essais de tout genre que l'on tente aujourd'hui, tout concourt à me prouver l'importance du but et je serais heureux que mes expériences pussent aider à l'atteindre.

Simplification de la méthode anglaise.

Pour les minerais anglais, rien ne serait changé à la méthode, et quelques modifications des appareils existants suffiraient pour essayer les expériences que je propose. La méthode serait réduite à ses termes les plus simples : 1° grillage du minerai et fonte pour matte ; 2° grillage de la matte par la vapeur d'eau à une basse température ; 3° fonte pour cuivre noir de la matte grillée ; 4° affinage du cuivre noir.

Quant aux minerais de l'Algérie, en vue desquels j'ai fait mes expériences, et dont le traitement sur les côtes de la Méditerranée pourrait doter l'industrie française d'une branche nouvelle, voici la méthode que je proposerais : Procédé que je propose pour le traitement des minerais de Mouzaïa.

1° Grillage du minerai par les procédés ordinaires, pour chasser une partie de l'arsenic et de l'antimoine;

2° Fonte pour matte, dans laquelle on passerait le minerai grillé et une certaine proportion de cuivre pyriteux qui pourrait être fourni par le gîte de Tenez;

3° Grillage de la matte par la vapeur d'eau;

4° Réduction de la matte grillée au moyen du fer métallique;

5° Affinage du cuivre noir.

Il serait avantageux d'appliquer pour la réduction de la matte grillée le procédé de MM. Rivot et Phillips qui leur a donné de bons résultats : la proximité des usines à fer d'Alais permettrait de l'employer, et l'on pourrait parvenir à obtenir un cuivre noir peu chargé de fer, à la condition de laisser un peu de cuivre dans la scorie; ce qui n'aurait pas d'inconvénient, puisque ces scories pourraient repasser dans la fonte pour matte.

J'ai fait des recherches pour m'assurer de la valeur de mon procédé dans le cas des cuivres gris argentifères. Les expériences ont été faites sur un cuivre gris antimonial mélangée de sulfure d'antimoine et de pyrite cuivreuse provenant du Pérou et qui tient 0,006 d'argent. Voici quels en sont les résultats : Opération intermédiaire pour tirer parti de l'argent contenu dans les cuivres gris.

1° Il ne se forme pas de traces de sels métalliques (sulfates, arséniates, antimoniates);

2° Il n'y a aucune perte d'argent dans le grillage;

3° L'argent se trouve seul à l'état métallique dans le produit du grillage.

Ces trois circonstances permettent d'appliquer avec

avantage l'amalgamation directe au minerai ou à la matte grillée ; il suffit de mélanger dans des tonnes tournantes le minerai grillé avec du mercure pour en retirer tout l'argent.

Une opération intermédiaire s'ajouterait donc à celles que j'ai décrites si on voulait retirer en même temps que le cuivre l'argent que renferment les cuivres gris : ce serait l'amalgamation directe de la matte grillée. On éviterait ainsi le procédé si défectueux de la liquation sans avoir à passer avant d'amalgamer par une chloruration dont l'expérience a démontré les inconvénients. Je ferai en outre observer que les procédés employés en Allemagne pour éviter l'emploi du mercure sont inapplicables aux minerais très-chargés d'arsenic et d'antimoine.

Grillage des speiss de nickel et de la blende.

Je signalerai encore quelques cas où le grillage par la vapeur d'eau pourrait être employé : les usages du nickel augmentent tous les jours ; le grillage des speiss est une opération compliquée, et sans nul doute l'emploi de la vapeur d'eau faciliterait le départ de l'arsenic et de l'antimoine ; enfin, dans l'industrie du zinc, on pourrait peut-être en tirer quelques avantages ; en effet, les gîtes calaminaires s'appauvrissent de jour en jour, la blende, au contraire, est signalée dans un grand nombre de localités : le traitement de ce dernier minerai est rendu très-difficile par l'imperfection actuelle des moyens de grillage. On sait, en effet, qu'une partie considérable du sulfure se transforme en sulfate, et cela en pure perte, car en présence du charbon le sulfate ne donne pas de zinc métallique, mais reproduit simplement le sulfure : or j'ai reconnu que la blende grillée par la vapeur d'eau se transforme en oxyde sans former de traces de sulfates.

Conclusion.

En résumé, j'ai fait voir dans cette note quelle était

l'action de la vapeur d'eau sur les minerais ou mattes de cuivre arsénifères et antimonifères, sur les speiss et sur la blende. J'ai décrit le procédé que j'ai employé en petit pour le grillage; j'ai démontré les avantages que l'on pourrait retirer en grand de son application au traitement des minerais de cuivre; j'ai fait voir comme conséquence de son emploi la possibilité d'appliquer l'amalgamation directe pour extraire l'argent des cuivres gris et les avantages de cette opération; je me réserve de publier plus tard la suite de mes expériences, espérant pouvoir appuyer par des chiffres les résultats économiques que j'ai annoncés, et prouver que dans la pratique se trouvent réalisées les deux conditions que toute méthode nouvelle doit remplir pour être applicable et qui sont : l'amélioration des produits, l'économie dans le traitement.

MÉMOIRE

SUR L'EXPLOITATION DE LA HOUILLE DANS LE BASSIN HOUILLER DE COMMENTRY (ALLIER).

Par M. TURBERT, ingénieur civil, ancien élève externe de l'École des mines (1).

La plupart des couches de houille puissantes actuellement exploitées en France ont été mal attaquées dès le principe. Le mode d'exploitation adopté presque partout consistait à ouvrir, de haut en bas, des étages successifs, plus ou moins espacés, suivant la dureté du charbon, et à découper la masse, au niveau de chaque étage, par des galeries dirigées, les unes dans la direction de la couche ou à peu près, les autres du mur au toit. Introduction.

Après le tracé de ces galeries, il restait pour soute-

(1) M. Turbert a été pendant plusieurs années ingénieur de l'exploitation de Commentry. M. Mony, ancien élève externe de l'École des mines, directeur et ingénieur en chef de cette exploitation depuis l'incendie de 1840, déclare que ce mémoire, dont il a eu communication, donne une description exacte du mode d'exploitation suivi à Commentry. M. Mony fait remarquer d'ailleurs qu'à ses yeux ce mode d'exploitation n'a rien de définitif; c'est une expérience faite très en grand, et parallèle à d'autres expériences du même genre, faites sur des données tout à fait analogues dans d'autres mines à grande puissance. Mais il faut une plus longue pratique pour juger ce mode d'exploitation dont la partie la plus difficile, la prise des tranches supérieures, n'a pas encore été commencée à Commentry, et est à peine commencée ailleurs. Depuis quelques mois des modifications de détail y ont déjà été introduites, et M. Mony en étudie en ce moment de plus importantes qui seront communiquées à la commission des *Annales des mines.*

nir la masse supérieure, une série de piliers de grandeur variable, mais la plupart du temps assez faibles, car on avait toujours en vue d'enlever par chaque étage, le plus de houille possible. Ces différents étages une fois exploités étaient abandonnés à eux-mêmes, ou remblayés avec des matériaux informes, le plus souvent de la terre. Dans le premier cas, les piliers s'amincissant à la longue de plus en plus, par suite de la charge qu'ils avaient à supporter et de l'action de l'air ambiant, on les soutenait par des boisages : mais on sent qu'un tel moyen de soutènement ne faisait que retarder leur chute : tôt ou tard il se produisait donc de vastes *écrasés* capables d'amener la ruine de plusieurs étages : de là, formation de menus qui au bout de quelques mois, s'échauffaient et occasionnaient des incendies spontanés fort difficiles à éteindre : il ne restait plus qu'à cerner par des barrages très-épais la partie de la mine incendiée, et toute la houille laissée en stots ou piliers dans les étages éboulés devenait la proie du feu. En outre, comme ces feux souterrains ne s'éteignent guère, on se trouvait avoir au-dessus des travaux en cours d'exploitation, un ennemi infatigable, qui tôt ou tard finissait par les envahir, si toutefois on ne pouvait l'extirper par des travaux à ciel ouvert; et malheureusement, dans la plupart des mines, un tel moyen était le plus souvent impraticable.

Dans le deuxième cas, les piliers de charbon mis à l'abri du contact de l'air, et maintenus par les remblais remplissant les galeries tracées, ne s'amincissaient plus, et l'on n'avait plus à craindre les écrasés des étages supérieurs et les incendies qui en étaient la conséquence; mais on perdait une masse énorme de houille qu'on ne pouvait songer à enlever ensuite que par des travaux à ciel ouvert : or ce mode d'exploitation ne peut s'appli-

quer qu'aux mines peu profondes et de très-grande puissance.

Dans les deux cas, pour peu que l'exploitation fût active, on atteignait assez rapidement de grandes profondeurs ; il fallait souvent déplacer les puits d'extraction, et par suite les machines, les appareils d'extraction, les embarcadères et les chemins de fer desservant chaque puits : or ces déplacements sont toujours onéreux et une cause d'embarras de toute nature. Il faut ajouter que ce système vicieux, en gaspillant les gîtes houillers, portait une grave atteinte à la richesse nationale.

Ce mode d'exploitation a été suivi à Commentry pendant fort longtemps; là comme partout où il a été appliqué, il a occasionné des éboulements et des incendies. Il est aujourd'hui remplacé par la méthode d'exploitation par remblais rapportés et complets.

C'est ce système, en cours d'exécution depuis quelque temps, que je me propose d'exposer avec détails. Avant d'entrer en matière, jetons d'abord un coup d'œil sur le bassin houiller de Commentry.

Bassin houiller de Commentry.

A l'inspection de la carte géologique (1), on voit de suite que le bassin houiller de Commentry est enclavé dans une dépression des terrains anciens qui l'environnent et le terminent nettement de toutes parts. Une grande partie du terrain houiller est recouvert par des terrains modernes, rapportés par M. Boulanger aux tertiaires : en quelques points, notamment près le château des Ferrières, aux environs de Cerclier, à l'un des angles de cette concession ; près de Champ-Fromenteau et du château de Saint-Front, dans la com-

(1) *Voir* la carte annexée à la statistique géologique de l'Allier, par M. Boulanger.

mune de Commentry, une roche éruptive, la dioritine, s'est fait jour à travers les terrains houillers et tertiaires et s'est épanchée à la surface. Ce bassin houiller s'étend du sud-est au nord-ouest; sa plus grande longueur est de deux lieues et demie environ; sa largeur moyenne est d'une lieue. Il est traversé dans sa longueur par le chemin de fer de Commentry à Montluçon. Par sa proximité au canal du Cher, la création d'usines considérables à Commentry et à Montluçon, la richesse des gîtes et la qualité des houilles qu'il renferme, il occupe le premier rang parmi les bassins houillers du département de l'Allier.

Concession des Ferrières.

Quatre concessions y ont été instituées (1). L'étendue superficielle de la concession des Ferrières est de 3 kilomètres quarrés, 69 hectares. Elle ne renferme qu'une seule couche reconnue par deux puits foncés près le château des Ferrières; les affleurements avaient déjà, vers la fin du dernier siècle, fourni une faible quantité de charbon. En 1838, des travaux assez importants ont fait reconnaître que l'épaisseur de cette couche variait entre 8 et 14 mètres; elle plonge vers l'est. La dioritine que l'on observe à la surface a été rencontrée dans la profondeur; elle a fracturé et bouleversé cette couche. On évalue le bloc de houille reconnu par les travaux de recherches à 400.000 hectol. Les concessionnaires n'ont donné aucune suite à cette découverte; et cependant, si à une certaine distance de l'affleurement dioritique, soit en direction, soit en aval pendage, la couche se réglait, comme cette concession est la plus voisine de Montluçon et qu'elle est traversée par le chemin de fer de Commentry, elle pourrait acquérir une grande valeur.

(1) Les détails qui suivent sont extraits de l'ouvrage de M. Boulanger.

La houille de Ferrières est assez dure, moins brillante que celle de Commentry : elle brûle avec flamme, puis se transforme en coke métalloïde blanc peu ou point boursouflé; elle laisse après la combustion un résidu gris assez abondant. Sa densité est de 1,31.

L'hectolitre pèse environ 80 kilogrammes ; l'analyse immédiate a donné les résultats suivants :

Coke.	Cendres.	9,90
	Charbon.	50,60
Produits volatils.	. . . .	39,50
	Total.	100,00

Le pouvoir calorique de cette houille est de 0,700.

Concession des Biolles.

Son étendue superficielle est de 3 kilomètres quarrés, 58 hectares. Elle ne renferme qu'une seule couche de $1^m,50$ de puissance et plongeant vers le sud; elle a été reconnue près du domaine de Menat, à quelque distance des terrains anciens. Cette couche renferme dans sa partie moyenne un lit de schiste qui réduit souvent à $0^m,50$, et même moins, l'épaisseur de la houille qui ne dépasse jamais un mètre. Le triage de ces schistes étant difficile, la houille fournie par cette couche est toujours impure et de qualité inférieure. Cette concession demeurera stérile jusqu'à ce que de nouvelles recherches y fassent découvrir d'autres couches plus puissantes, et un combustible de meilleure qualité.

La densité de la houille des Biolles est de 1,35.

Voici sa composition :

Coke.	Cendres rougeâtres. . .	15,40
	Charbon.	49,80
Matières volatiles.	. . . .	34,80
	Total.	100,00

Son pouvoir calorifique est de 0,670.

Concession du marais.

Son étendue superficielle est de 2 kilomètres quarrés, 97 hectares.

On ne connaît au marais qu'une seule couche de houille de nature anthraciteuse dont la découverte date du 19 janvier 1840. Le puits de recherche, après avoir traversé sur 20 mètres le dépôt tertiaire, a atteint le terrain houiller et, à la profondeur de 100 mètres, la couche de combustible. Son allure est assez irrégulière; elle est très-inclinée et parfois verticale, quelquefois interrompue par des étranglements ou des dérangements; sa direction est à peu près du nord au sud. L'épaisseur moyenne de cette couche, qui en certains points est de 8 mètres, n'est en moyenne que de 3 à 4.

Par la nature de ses produits, comme par sa position à peu de distance des bords du bassin houiller, elle se rattache vraisemblablement à la couche d'anthracite des Reynauds dans la concession de Commentry.

Cette anthracite est d'un noir tirant sur le gris et sa poussière est noire, son éclat semi-métallique, sa cassure vitreuse et conchoïde; en général elle est homogène et les fragments sont à bords aigus et tranchants. Elle brûle lentement, en dégageant d'abord une légère flamme bleuâtre et le plus souvent une forte odeur sulfureuse. Sa densité est de 1,38 et le poids de l'hectolitre est de 90 kilogrammes.

Sa composition est la suivante :

Coke. .	Cendre légèrement rougeâtre. . . .	4,60
	Charbon.	83,80
Matières volatiles.		11,60
	Total.	100,00

Le coke produit par la distillation est entièrement pulvérulent. Son pouvoir calorifique est de 0,930, celui du carbone pur étant représenté par l'unité.

Exploitation.

L'exploitation dans la mine du Marais est desservie par deux puits, dont l'un, garni d'échelles, sert pour la descente des ouvriers, l'autre, muni d'une machine à vapeur, pour l'épuisement des eaux et l'extraction de l'anthracite.

Jusqu'à présent les travaux intérieurs ont été bornés à la confection d'un petit nombre de galeries de direction dont une principale pour le roulage, et de quelques remontes destinées à réunir les divers étages. La poussée des terres est considérable dans cette mine et les galeries, pour être maintenues, exigent un boisage soigné et dispendieux.

Partie non concédée.

Entre les concessions des Ferrières et des Biolles il existe un lambeau de terrain houiller non concédé; mais des recherches faites en 1834 sur un affleurement charbonneux que l'on observe à la jonction des chemins de Malicorne à Pionsat et de Commentry à Colombier n'ont fait reconnaître qu'une seule couche de $0^m,20$ d'épaisseur, de nature anthraciteuse et impure; d'ailleurs ce lambeau de terrain houiller a si peu d'étendue qu'il faudrait y rencontrer une masse de houille très-puissante pour y établir une exploitation profitable.

Concession de Commentry.

Sa surface est de 20 kilomètres carrés 88 hectares. Elle comprend toute la commune de Commentry. La houille de la principale couche de cette concession est généralement pure et de bonne qualité; la cassure est conchoïde et extrêmement brillante, sa poussière est d'un noir brun foncé. Cette houille brûle avec une flamme vive et fuligineuse, et par ses caractères extérieurs se rapproche du cannel-coal du Lancashire, mais elle est plus dure et plus brillante. Sa densité est de 1,319. L'hectolitre ne pèse que 78 kilogrammes.

L'analyse immédiate a donné les résultats suivants :

Coke. . . .	Cendres.	2,00
	Charbon.	58,80
Produits volatils.		39,20
	Total.	100

Le pouvoir calorifique de cette houille est de 0,82. Elle appartient à la classe des houilles sèches à longue flamme ; elle est fort recherchée pour les grilles et le chauffage, et peut être considérée comme de première qualité pour la fabrication du gaz d'éclairage.

Cette houille donne un coke métalloïde d'un gris presque blanc et très-brillant. En grand, ce coke forme des masses radiées qui se séparent en prismes aigus et faibles.

Les détails qui précèdent, bien qu'ils datent de 1844, s'appliquent encore en tous points aux concessions des Ferrières, des Biolles et du Marais ; en effet, les travaux de recherches ou d'exploitation exécutés dans ces trois concessions depuis cette époque ont été presque nuls. Il n'en est pas de même dans celle de Commentry ; nous allons donc compléter les indications de M. Boulanger par de nouveaux détails sur la puissance et les allures des gîtes de cette dernière concession.

Dans la partie nord, près du domaine des Reynauds, il existe une couche d'anthracite identique avec celle du Marais ; sa puissance varie de 6 à 8 mètres. Ce gîte a été peu exploité ; les travaux y sont suspendus depuis plusieurs années.

En marchant vers le sud on rencontre d'abord une couche mince de 1 mètre d'épaisseur environ séparée de la grande par quelques mètres de schiste houiller ; puis la grande couche dont la puissance est très-variable. Vers l'ouest, sa puissance n'est guère que de 1^{m},50 à 2 mètres, et son allure est peu régulière ; en marchant vers l'est, avant d'atteindre le puits Saint-Antoine, elle se renfle tout à coup et sa puis-

sance à la hauteur de ce puits va jusqu'à 23 mètres comptés verticalement. Un peu plus loin, entre l'Union et Saint-Antoine, le mur et le toit se rapprochent et forment un étranglement considérable ; puis ils s'écartent, et à la hauteur du puits de l'Union elle reprend la puissance qu'elle avait à Saint-Antoine. En continuant de marcher vers l'est, sa puissance diminue peu à peu ; un peu au delà du puits Saint-Edmond, le mur et le toit ont éprouvé des atteintes de la dioritine ; par suite ils ont pénétré tous deux et de concert avec la roche éruptive dans la masse charbonneuse, mais sans qu'il y ait eu interruption complète de la houille. Ce dernier fait s'est présenté dans deux des étages supérieurs : au delà des points que nous venons de signaler, le toit et le mur se poursuivent avec une régularité parfaite ; mais toujours en se rapprochant insensiblement l'un de l'autre. Vers l'extrémité Est deux nerfs ou bancs de grès et schiste se forment dans la masse charbonneuse et l'accompagnent en stratifications concordantes, tout en permettant l'ouverture de trois galeries d'allongement en plein charbon. Dans cette région, la couche présente encore 7 à 12 mètres de houille exploitable ; à l'extrémité, la petite couche comprise entre le toit et le gros nerf qui l'avoisine, disparaît presque entièrement, et il reste encore deux couches séparées par le nerf du mur, soit 4 à 5 mètres de houille exploitable. La couche tourne assez brusquement vers la droite, et paraît devoir se diriger vers Longiroux, où il existe d'ailleurs des affleurements de charbon.

A ce niveau de 62 mètres, la grande couche est reconnue et exploitée sur une longueur de 2.200 mètres, et les travaux de recherche et d'exploitation se poursuivent toujours vers l'est ; des sondages exécutés au delà de la rivière de la Banne et qui tous ont rencontré

la houille font espérer que les travaux pourront s'étendre jusqu'à la hauteur de la Croix-Torche, ce qui donnerait un développement de 2.500 mètres. Là elle viendra sans doute se perdre sur les granites qui terminent le terrain houiller et apparaissent un peu plus loin à la surface.

Sur toute cette longueur, l'inclinaison de la couche varie depuis 10 degrés jusqu'à 55 environ; ce sont les masses de Saint-Antoine et de l'Union qui présentent la plus faible pente; c'est à peu près sur la ligne qui unit les affleurements dioritiques de Champ-Fromenteau et du château de Saint-Front que l'on remarque l'inclinaison de 55°: au delà et en deçà de cette ligne, l'inclinaison est plus faible et va toujours en diminuant, soit que l'on s'avance vers l'est ou vers l'ouest. Le pendage est variable; un fait remarquable, c'est que l'inclinaison diminue à mesure que la profondeur augmente. Ceci porterait à croire que la couche se relève vers le sud dans la profondeur et forme une espèce de cul-de-lampe.

Elle affleure presque partout: les énormes renflements de l'Union et de Saint-Antoine, l'étranglement considérable qui existe entre ces deux puits, au moins dans les étages supérieurs, la réduction presque instantanée d'une puissance de 23 mètres à celle de 2 mètres attestent un soulèvement énergique du mur de la couche; au delà de ce soulèvement peut-être existe-t-il d'autres renflements suivis d'une partie réglée comme vers l'est. C'est ce que l'avenir apprendra, si toutefois la compagnie de Commentry se détermine à rechercher le prolongement de cette couche. Ceci est probable, car l'extrémité Ouest des travaux est fort loin encore des limites de la concession, et la compagnie n'a pas à craindre d'éclairer ses voisins en s'éclairant elle-même. Au delà de ces limites il ne serait pas impossible que

l'on trouvât des massifs de charbon, soit au nord, dans la concession des Biolles, soit au sud dans la concession du Marais, faisant suite à cette couche et se rattachant au gîte des Ferrières.

En cas de succès, les moyens de transport seraient faciles à créer, puisque le chemin de fer de Commentry passe précisément aux environs des points de contact des trois concessions des Biolles, du Marais et des Ferrières.

Les allures de cette grande couche, sa puissance, la qualité de son charbon, en font une des plus belles de France. En avançant vers le sud, on rencontre aux Bryats deux petites couches de houille de 1 mètre à $1^{m},50$ de puissance; cette houille est assez semblable à celle de la grande couche, cependant elle est parfois tellement dure qu'il faut l'exploiter à la poudre. Elles n'ont que peu d'importance, parce que leur allure est fort irrégulière; le toit et le mur se rapprochent fréquemment et assez pour faire disparaître complétement le charbon; on y a fait quelques travaux situés à une faible profondeur.

Enfin, au sud, aux environs de Champ-Fromenteau, on a constaté l'existence de plusieurs petites couches de houille analogues à celle reconnue vers le nord; mais ces recherches ayant lieu par des treuils à bras, on n'a pu vaincre les eaux : le voisinage du ruisseau de la Banne sera toujours un obstacle à l'exploitation de ces petites couches.

Il résulte de cet exposé que la concession de Commentry renferme au moins six couches de houille et une d'anthracite; une seule, la grande, est exploitée en ce moment.

Dans cette concession, le terrain renfermant les couches de houille repose sur un poudingue à noyaux granitiques extrêmement dur; les schistes et grès houillers

sont en général bien stratifiés et durs; les terrains tendres de la surface sont peu épais, les schistes ne deviennent tendres que dans le voisinage des couches, surtout aux approches des plis que forme le toit de la grande dans les renflements de l'Union et de Saint-Antoine. Ces conditions sont éminemment favorables à l'exploitation par remblais; car, ainsi qu'on le verra dans ce mémoire, il importe d'avoir à sa disposition des matériaux durs et de gros échantillons.

Ancien mode d'exploitation. La découverte de la houille dans la concession de Commentry paraît remonter à la fin du XVI[e] siècle; l'exploitation a eu lieu pendant près de deux cents ans sur l'affleurement de la couche, sans aucune règle et par chaque propriétaire. Les extracteurs se servaient de treuils à bras ou de manéges à chevaux, enlevaient la houille par des travaux à ciel ouvert, en prenant la totalité du combustible : ou par travaux souterrains, en exploitant par étages successifs, en descendant, laissant dans chaque étage une série de piliers pour soutenir les plafonds, et sans remblayer; ce mode d'exploitation s'est continué sous le régime des concessions jusqu'au moment où il a été remplacé par le nouveau système que je me propose de décrire.

Nouveau mode d'exploitation. L'ancien système d'exploitation s'étend jusqu'au niveau de 62 mètres environ au-dessous de la surface. Tous les niveaux inférieurs sont exploités d'après le nouveau système; voici en quoi il consiste : Tous les 12 mètres à peu près on ouvre un étage, la galerie de roulage est établie sur le mur de la couche. Elle le suit dans toutes les sinuosités, excepté lorsqu'il fait des crochets trop grands; dans ce cas on la mène en plein charbon et de manière à rejoindre le mur un peu plus loin. Cette galerie a $2^m,50$ de largeur en bas, $2^m,30$ en haut et $2^m,10$ de hauteur. Ces dimensions doivent

existER en dedans des bois, lorsque les parois ont besoin d'être étayées. La pente adoptée est la plus faible possible, $0^m,005$ au plus en descendant vers le puits. Il suffit que les eaux puissent s'écouler; cela est indispensable, car si cette pente est favorable à la descente du charbon, elle est un obstacle à la remonte des remblais. A partir de la galerie de roulage on ouvre tous les 10 mètres une traverse formant à peu près avec elle un angle droit : toutes ces traverses sont parallèles entre elles, afin de conserver aux piliers une épaisseur à peu près constante. Elles ont $1^m,50$ de large et $2^m,30$ de hauteur; leur section en travers est rectangulaire; on les pousse jusqu'au toit de la couche. Dès que la galerie de roulage et ces traverses ont acquis un certain développement, le travail préparatoire de l'étage est terminé et l'exploitation véritable peut commencer. A l'extrémité de chaque traverse on ouvre à droite et à gauche, sous le toit, deux bouts de galerie d'allongement qui traversent les deux piliers voisins. Les dimensions de ces bouts de galerie sont variables suivant les allures du toit dans le voisinage. S'il est contourné, ce qu'il est facile de constater d'avance au moyen des plans de la mine, les schistes sont brisés et peu adhérents; dans ce cas, il faut adopter de petites dimensions, 2 mètres de large au plus et $2^m,30$ de haut. Sinon on est presque certain de provoquer l'éboulement des schistes du toit; il se fait alors une cloche toujours beaucoup plus difficile et dangereuse à remblayer qu'une galerie ordinaire. Si au contraire le toit présente une allure régulière, les schistes sont en général bien stratifiés, et on peut ouvrir ces petites galeries d'allongement sur 3 mètres de large et $2^m,30$ de hauteur. Leur section, comme celle des petites traverses, est rectangulaire autant que possible. Pendant l'exécution de ces bouts de galeries,

on soutient le plafond, si cela est nécessaire, par quelques buttes que l'on retire la nuit, pendant le poste de remblais. Ces derniers se posent de la manière suivante : on construit, avec de gros matériaux, un mur vertical de 1 mètre d'épaisseur; on choisit de préférence les gros schistes plats, et on lie la maçonnerie autant que possible en croisant les joints des pierres; derrière ce mur, on jette à la pelle et à la main les matériaux tout venants; on les bourre le mieux possible, de manière à ne pas laisser de vides entre les remblais et le plafond.

Les deux bouts de galeries et la traverse étant ainsi remblayés, on recommence tout le long du mur deux autres bouts de galeries que l'on remblaye de même, en conservant toujours le même ordre dans la pose des matériaux tout venants et du mur de soutènement. En continuant ainsi, on recule jusqu'à une certaine distance de la galerie de roulage. Il ne convient pas d'atteindre cette galerie, parce qu'alors elle s'écraserait, et il faudrait beaucoup de bois pour la rétablir et lui conserver les dimensions qu'elle doit avoir. Le massif à laisser intact provisoirement dépend beaucoup de la dureté du charbon.

Au lieu d'attaquer les piliers par flancs, on peut dépiler sur toute leur longueur en marchant vers la galerie de roulage. Cette méthode présente ces deux avantages, que l'on peut occuper plus de piqueurs dans un espace moindre et que l'abattage n'exigeant qu'une coupe en dessous est plus facile et par suite moins coûteux. Les remblais se posent d'ailleurs exactement de même.

En suivant le même système dans chacune des traverses, on peut dépiler une grande partie de l'étage, tout en poussant de nouvelles traverses préparatoires,

et aussi la galerie de roulage vers l'est et l'ouest. Il convient de mener les dépilages de front, afin de ne pas fatiguer mal à propos certains piliers qu'il serait ensuite plus difficile de traverser plus tard. Dès lors le plafond, dans la partie sud de l'étage, s'appuie doucement sur les remblais, sans secousse et sans danger pour les ouvriers.

Le charbon sort par les traverses pour se rendre dans la galerie de roulage et de là au puits d'extraction; les remblais arrivent par le puits, se rendent dans la galerie de roulage, et de là dans les traverses. Ils suivent donc les mêmes voies, mais en sens inverse; ils sont transportés dans les mêmes wagons. Quand on est parvenu aux limites assignées à l'étage, on enlève en reculant les massifs réservés le long de la galerie de roulage; cette galerie est remblayée en même temps que ces massifs, et de proche en proche on vient se fermer au puits d'extraction. Depuis dix-huit mois, cette méthode d'exploitation est en activité dans l'un des nouveaux étages et l'on n'a qu'à se louer de son application. Tout fait présumer que l'on parviendra à enlever complétement la première tranche; ce travail terminé, on laissera le plafond s'asseoir sur les remblais, et dès qu'il sera parvenu à l'immobilité ou à peu près, on ouvrira sur ces mêmes remblais un nouvel étage que l'on traitera comme le premier; en continuant de s'élever ainsi, on parviendra jusqu'aux premiers remblais de l'étage supérieur. Comme il se sera écoulé un temps fort long depuis leur pose et qu'ils auront subi à diverses époques d'énormes pressions, il est probable qu'ils seront devenus assez compactes pour former plafond. Ceci est peut-être exagéré, mais si l'on ne peut s'élever aussi haut, il est évident qu'il suffira de laisser une planche de charbon assez mince entre ces vieux

remblais et le dernier étage dépilé. Il est fâcheux que l'on ne puisse donner aux galeries de dépilage plus de 3 mètres sur 2m,30 ; de plus fortes dimensions feraient baisser le prix d'abattage. Mais il paraît que la manière d'être des lits de charbon ne permet pas de donner plus de 3 mètres de largeur aux galeries sans qu'il y ait danger pour les ouvriers. Quant à la hauteur 2m,30, on pourrait sans doute l'augmenter un peu, mais alors les piqueurs seraient obligés de s'élever sur des tréteaux, leur travail serait plus pénible. D'un autre côté, la pose des remblais serait aussi plus difficile.

Toutes les galeries s'exécutent en faisant une entaille au sol et une autre de chaque côté, puis abattant le bloc ainsi détaché avec des coins de fer. Les galeries en dépilage ordinaire n'exigent que deux coupes, une au sol, une autre de côté, et même une seule coupe, en dépilant à la fois sur toute la largeur des piliers et marchant du toit au mur : ceci dans l'exploitation de la première tranche. Elles sont donc payées un tiers de moins à peu près ; et même, dans la seconde manière de dépiler, on peut les payer moitié moins. En effet, quand les ouvriers se trouvent à une certaine distance du toit, les piliers sont toujours fatigués dans le voisinage des remblais, ce qui diminue les difficultés d'abattage.

Pendant l'exploitation de la deuxième tranche, ces mêmes galeries prises par flanc n'exigeront qu'une coupe de côté. D'une autre part, il est possible qu'il faille plus de bois dans cette deuxième tranche que dans la première ; c'est ce que l'expérience apprendra.

Introduction des remblais.

La grande couche de Commentry gisant à une faible profondeur au-dessous du sol, on ne pouvait songer à ouvrir des chambres d'emprunt dans le toit, comme cela se pratique dans plusieurs bassins houillers, en

vue de se procurer des remblais. En supposant que ces chambres d'emprunt eussent fourni toute la pierre nécessaire, sans danger pour le personnel, dans un délai très-court, on aurait eu des affaissements à la surface, qui auraient bouleversé les voies de fer, les chemins, les cours d'eau, etc.

Il fallait donc les prendre au jour, et tout naturellement on a été conduit à découvrir l'affleurement. Voici comment le travail s'exécute (Pl. I, *fig.* 2 et 3) :

Soient AC le sol, AB un puits d'extraction, BDE l'étage en exploitation. A une certaine distance des puits, on fonce un ou deux bures verticaux de 2 mètres de diamètre environ et de 25 à 30 mètres de profondeur; à partir du fond de ces bures, on ouvre une galerie de roulage, de niveau ou à faible pente vers le puits. On donne à cette galerie les mêmes dimensions qu'à la galerie de roulage, sur le mur de la couche, c'est-à-dire $2^m,50$ en bas, $2^m,30$ en haut et $2^m,10$ de hauteur. En K on ouvre un accrochage ayant pour dimensions : largeur, 3 mètres; longueur, 6 mètres; hauteur, $2^m,10$. Sur le bord du puits, on l'exhausse jusqu'en *i*, de manière à donner à K*i* 5 à 6 mètres de hauteur, et l'on emporte un coin de la roche *ino*, ceci pour faciliter la sortie des chaînes et des bennes chargées de remblais. On élargit les bures à leurs bases pour faciliter le chargement des bennes, puis à leur tête on ouvre un chantier d'extraction pour pierres. Les matériaux qui en proviennent sont lancés dans les bures, chargés et roulés au puits d'extraction; la machine les descend à l'accrochage inférieur, qui est d'ailleurs semblable à l'accrochage supérieur; de là ils sont roulés à la galerie sur le mur, puis introduits dans les traverses et de là dans les ateliers à remblayer.

Peu à peu il se fait à la tête des bures un vaste en-

tonnoir taillé en gradins, sur les parois duquel glissent les matériaux, et il arrive un moment où les voies de roulage de la galerie *g*K peuvent être prolongées et où les chargeurs travaillent à découvert. Il faut hâter cette époque le plus possible, parce qu'alors on peut choisir les matériaux suivant les besoins des remblayeurs. Il importe d'avoir pour l'exécution des murs *ab*, jointifs aux piliers de charbon, des matériaux durs et de gros échantillons; en effet, ces murs résistent mieux à la poussée du terrain tout venant jeté derrière eux et aussi à la pression du plafond. En outre il importe de ne pas avoir plus des deux tiers en tout venant; mais ceci est en général assez facile, les schistes et grès de Commentry étant ordinairement bien stratifiés et assez durs. La galerie *g*K ne doit pas être ouverte à une trop grande profondeur, sans cela les matériaux tombent de trop haut et fournissent trop de menus.

Le roulage du charbon et l'exploitation de la pierre pour remblais ont lieu le jour; le roulage et la pose des remblais se font la nuit. Les machines ont ordinairement trois à quatre heures de repos sur vingt-quatre.

Volume des remblais absorbés par puits.

La plupart des puits d'extraction de Commentry rendent dans dix heures de travail 400 bennes de charbon, de 3 1/3 hectolitres chacune, soit 1.330 hectolitres. L'un d'eux est parvenu à 450 et probablement atteindra le chiffre de 500 bennes.

Prenons ce chiffre pour base, et voyons quelle masse de remblais est absorbée journellement par un tel puits: admettons que la galerie de roulage ne marche que d'un côté, et qu'elle avance de 2 mètres par jour; qu'il y ait en préparation trois traverses, et qu'elles avancent de $1^{m},50$ par jour; ces quatre ateliers produiront par poste $15^{mc},25$ de houille, et comme le mètre cube donne

environ 14 hectol., ce sera 214 hectol. Les dépilages produiront donc 1.436 hectol. Ce volume sera fourni par 14^{m},86 de galeries en dépilage ayant 3 mètres de large et 2^{m},30 de hauteur. Comme le remblayage de 20 mètres de galerie en dépilage exige en effet 21^{m},50, puisqu'il faut boucher à mesure les petites traverses, il s'ensuit qu'au lieu d'avoir à remblayer chaque jour 14^{m},86 de galeries, on en aura effectivement 15^{m},97, qui correspondent à 110^{mc},19 de remblais posés. Or un mètre cube de roche massive donne, d'après des essais réitérés et avec des roches différentes, 1^{mc},50 foisonné. Par suite, les 110^{mc},19 mis en place exigeront 73 à 74 mètres cubes massifs. Comme chacun de ceux-ci fournit 4 1/2 bennes de 3 1/3 hectolitres, il en résulte qu'une extraction de 500 bennes de charbon exigera la mise en place de 333 bennes de remblais. Par année de 300 jours, ce serait 22.200 mètres cubes massifs, ou 33.300 mètres cubes foisonnés, ou 99.900 bennes. On comprend pourquoi les traverses ont de si faibles dimensions, au risque d'augmenter le prix de revient du charbon qu'elles fournissent; comme il faut les remblayer en même temps que les galeries de dépilages, si elles avaient de grandes dimensions, il y aurait un arriéré de remblais assez grand, et dans ce système d'exploitation, la principale difficulté ne consiste pas à extraire du charbon, mais bien à remplir exactement la nuit les vides faits le jour. D'un autre côté, les grands piliers et les petites traverses fatiguent moins la galerie de roulage; celle-ci exige moins de bois, il en est de même des traverses.

Il est très-important de ne pas laisser longtemps vides, surtout aux approches du toit, ou dans les étranglements, les galeries en dépilage. Dans ce cas, on consomme beaucoup de bois en pure perte, la masse

s'étonne et il se fait parfois des cloches dans le plafond, qu'il est ensuite difficile et même dangereux de remblayer, et cependant il faut bien se garder de laisser quelque massif de charbon perdu au milieu des remblais; le plafond, en s'appuyant, l'écraserait, et le feu s'y mettrait infailliblement dans un bref délai.

Les avantages de ce mode d'exploitation sont évidents :

Avantages du nouveau mode d'exploitation.

1° On peut enlever toute la masse charbonneuse, ou à peu près. La houille devenant de plus en plus indispensable à l'industrie, ce résultat est de la plus haute importance; les compagnies passent vite, mais les peuples ne meurent pas.

2° Les causes d'incendies disparaissent, surtout si on a le soin de ne laisser au milieu des remblais aucun massif de houille, même très-petit.

3° La durée d'un massif de houille étant représentée par l'unité dans l'ancien système, le sera par cinq dans le nouveau; c'est-à-dire qu'un puits d'extraction, au lieu de durer dix ans, en durera cinquante.

J'en dis autant des appareils qui l'accompagnent; cette condition doit amener des économies considérables et atténuer la dépense nécessitée par la pose des remblais.

4° Enfin, une autre considération milite puissamment à Commentry en faveur de ce nouveau mode d'exploitation; en découvrant l'affleurement aux points où la couche a le plus d'épaisseur, de 15 à 23 mètres, et sur une longueur de 400 mètres, on se ménage la possibilité d'arracher un jour les feux souterrains qui existent encore dans les étages supérieurs.

De plus, au fur et à mesure que les extracteurs de pierres arriveront à la houille, on pourra exploiter à ciel ouvert des blocs énormes dont le bas prix atténuera

singulièrement la dépense des remblais dans les travaux souterrains.

Transports souterrains du charbon et des remblais.

Il y a quelques années, les puits d'extraction étaient à dessein fort rapprochés sur quelques points; les transports souterrains se faisaient à la brouette ordinaire; le charbon était déchargé aux accrochages, puis rechargé dans des tonneaux de 3 ou 6 hectolitres. Ces tonneaux élevés au jour par des manéges étaient reçus et renversés à la tête d'une grille qui classait les charbons en deux qualités, dites menu et gros. Mais le plus généralement on se servait de chariots porteurs de tonnes courant sur un chemin de fer. S'il était permis de multiplier les puits près de l'affleurement, il était urgent de les réduire dès l'instant qu'il fallait attaquer le gîte à des profondeurs plus considérables. La durée des fonçages, leur prix de revient assez élevé à cause des masses d'eau à épuiser; l'établissement des machines, engins et travaux d'art qui les accompagnent toujours, en faisaient une loi; mais l'adoption du système d'exploitation par remblais obligeait à modifier le matériel de transport. Il fallait une benne qui pût s'employer, à la fois, pour le charbon et pour les remblais.

Wagon souterrain.

Comme wagon souterrain, on choisit la benne à roulettes en usage depuis plusieurs années dans les exploitations des environs de Saint-Étienne (Pl. I, *fig.* 4 et 5). Elle contient 3 hectol. et 1/3; la caisse est un tronc de cône ayant pour base une ellipse. Sous la caisse sont fixés trois tasseaux en chêne, qui portent les essieux et les roues; ils sont boulonnés avec le fond. Les essieux sont quarrés et boulonnés avec le tasseau du milieu; on les arrondit à l'endroit des roues et jusqu'aux extrémités. Les trois tasseaux en chêne sont reliés à la caisse par des bandes de fer feuillard assez épais qui recou-

vrent en même temps les fusées des essieux. La benne porte à sa partie supérieure deux fortes oreilles qui sont saisies par les crochets des chaînes-câbles. Vers la partie moyenne sont fixés deux crochets par quelques mailles et une ferrure, appropriée, appliquée au dehors et au dedans de la benne, de manière à intéresser plusieurs douelles; ils servent à atteler les bennes pour en former des convois. Dans les mines des environs de Saint-Étienne, les roues sont à claire-voie, en fonte grise et non trempée; l'expérience a démontré qu'il convenait de les faire pleines, en fonte grise, mais trempée jusqu'à une ligne de profondeur environ. Elles supportent mieux les chocs à leur arrivée au fond et au jour, et surtout dans les puits; en outre, elles s'usent moins vite par leur frottement contre les rails. A Commentry, au lieu d'atteler les chevaux au moyen de palonniers fixés aux crochets des bennes, on se sert de brancards en fer, très-légers (Pl. II, *fig.* 15 et 16), entièrement supportés par les chevaux quand ils sont dételés : ces brancards présentent une espèce d'anneau qui est traversé par l'oreille de la benne; une clavette courbe fixe les brancards. Ce système est très-avantageux; les chevaux sont très-vite attelés et dételés, ils peuvent modérer à volonté la vitesse des convois. Quant au poids du brancard pendant la marche, il est à peu près insignifiant.

Les bennes à roulettes présentent les avantages suivants : peu élevées, elles sont faciles à charger, même dans les galeries basses; d'un faible poids, deux hommes les remettent aisément sur les voies, quand elles déraillent, ou les font sauter d'une voie sur une autre, ce qui se présente toutes les fois qu'une benne de remblais ou de charbon doit passer de la voie de roulage dans une traverse, ou réciproquement. Elles

peuvent servir dans des galeries inclinées et s'atteler aux câbles en fil de fer des plans automoteurs. Les roues très-rapprochées permettent d'établir une double et même une triple voie dans des galeries à section moyenne; il en résulte donc une économie de boisages. Ces roues, entièrement cachées par la caisse, se trouvent, pendant l'ascension dans les puits, à l'abri des chocs; les essieux, fortement appuyés contre les trois tasseaux, peuvent aussi supporter, sans ployer, des chocs violents; ce qui arrive quand on reçoit les convois au jour et au fond, et quand une benne vient à se décrocher pendant l'ascension. Ces bennes peuvent être poussées par des hommes, ce qui a lieu, en effet, jusqu'à 200 mètres et 300 mètres des puits d'extraction, ou traînées par des chevaux. Sur une pente de $0^m,005$ au plus, un cheval de force ordinaire peut descendre, pendant les postes de charbon, 12 à 15 bennes en remontant à vide, et remonter pendant les postes de remblais six à sept bennes en descendant à vide. Il parcourt dans une poste environ 18.000 mètres.

Les bennes attelées sont espacées d'environ $0^m,20$; il en résulte qu'elles tournent sans dérailler, dans les courbes les plus fermées, n'auraient-elles que 2 mètres de rayon. Cependant, comme de telles courbes fatiguent beaucoup les chevaux, on les évite autant que possible en modifiant la direction des voies de roulage.

Voies de fer.

Les rails souterrains sont tout simplement des barres de fer plat ayant $0^m,06$ à $0^m,07$ de large, et $0^m,01$ d'épaisseur; leur longueur est très-variable; en général, elle est de 6 mètres. Ils sont fixés sur des traverses en chêne, de $0^m,12$ de large sur 0,08 d'épaisseur environ, et maintenus par des cales en chêne, suivant la méthode ordinaire. On pourrait se servir dans les galeries de roulage, excepté dans les courbes trop fer-

mées, de rails à champignon, qui s'ajusteraient de même sur des traverses en chêne. Cette forme userait moins vite les roues des bennes, mais les rails pèseraient davantage et coûteraient plus cher.

Les galeries de roulage sur le mur de la couche, celles qui mènent de ces galeries aux puits d'extraction, les galeries ouvertes près de la surface pour amener les remblais aux puits, renferment toujours une double voie; par suite, l'une des voies sert à la descente, et l'autre à la remonte des convois. Par économie, on aurait pu ferrer les galeries de roulage à simple voie, et établir des croisements de distance en distance. On a préféré une voie plus coûteuse, mais plus simple, et telle que les convois ne fussent jamais arrêtés, soit par le dérangement des croisements, soit par les stationnements qu'ils nécessitent; ceci en vue de faire produire à chaque puits d'extraction le plus possible.

L'expérience prouve que le prix de revient du charbon diminue à mesure que le rendement du puits augmente.

L'écartement des rebords des roues de bennes étant de $0^m,36$, on donne $0^m,38$ d'écartement aux rails, dimension prise en dedans; on laisse un mètre d'écart entre les milieux des deux voies: la largeur des bennes étant de $0^m,85$, on voit qu'il reste entre deux bennes qui se croisent, 0^m20, et entre les bennes et les parois de la galerie de roulage, $0^m,33$.

Les traverses ne reçoivent qu'une seule voie; quand elles sont longues (dans les renflements des puits de l'Union et Saint-Antoine, il y en a qui ont jusqu'à 150 mètres), on ouvre dans les piliers voisins, de distance en distance, de petites gares; les bennes vides sont renversées sur le côté, pour laisser passer les

pleines ; puis on les relève et on les enraille de nouveau, ce qui se fait avec la plus grande facilité.

L'empierrement reconnu le meilleur pour ces voies souterraines, qui sont plus ou moins trempées d'eau, sont les scories de mazeries ou de fours à puddler ; les plus gros morceaux occupent la partie inférieure : on termine par du menu, en recouvrant légèrement les traverses en chêne. Il suffit d'ailleurs d'empierrer les voies des chevaux. On comprend, sans qu'il soit nécessaire d'insister sur ce sujet, combien une galerie de roulage bien entretenue influe sur le rendement d'un puits et sur le prix de revient du charbon, surtout quand il s'agit, comme à Commentry, d'un transport souterrain de 2.000 mètres.

Une précaution utile à prendre, c'est de ferrer les chevaux à chaud dans les travaux souterrains ; il est très-facile d'y installer une petite forge volante, alimentée par du charbon de bois, si l'airage n'est pas très-actif. Les fers tiennent beaucoup plus longtemps que lorsqu'ils sont ajustés au dehors, et posés à froid dans le fond. Les chevaux habitués au roulage mettent ordinairement deux jambes dans la voie, et les deux autres dans l'entre-voie ; malgré cette précaution, toute d'instinct, leurs pieds portent souvent sur les rails, ce qui ébranle les fers. Les scories ferrugineuses, en s'introduisant entre le fer et la corne, peuvent les blesser à la longue.

Nous distinguerons plusieurs sortes de platelages : Platelages en tôle.

1° Ceux des accrochages des remblais et du charbon.

Ils sont composés (Pl. I, *fig.* 6 et 7) de traverses recouvertes de fortes planches de chêne, sur lesquelles on fixe par de grands clous à tête fraisée trois à quatre feuilles de tôle de $0^m,01$ d'épaisseur, $2^m,50$ de longueur et 1 m. de largeur. Ces feuilles sont posées de manière que leur

longueur soit perpendiculaire à l'axe de l'accrochage : des amorces ou pièces de fer recourbées sont clouées sur la tôle, et les rails viennent aboutir à leurs naissances, en s'appuyant sur la dernière traverse du platelage. Ces amorces facilitent beaucoup l'enraillage des bennes vides pendant les postes de charbon, ou des bennes pleines pendant ceux des remblais.

Ces platelages s'étendent jusqu'au bord du puits d'extraction ; quand celui-ci descend au-dessous du sol de l'accrochage, on établit à 2 mètres environ plus bas, un très-fort plancher composé de traverses et de madriers de chêne. Les traverses sont engagées dans les parois du puits. On recouvre ce plancher de terrain menu sur lequel on fixe un autre plancher semblable au premier, mais bien dressé et formant suite au platelage en tôle ; on lui donne un peu de pente vers l'accrochage. Pendant les postes, les bennes vides ou pleines sont reçues sur ce plancher au lieu de l'être sur la tôle, ce qui préserve les roues, et d'ailleurs facilite la réception.

Le double plancher est établi en prévision de la chute d'une benne ou même d'un convoi, par suite de la rupture du câble ; il doit être assez solide pour résister au choc. Dans ce cas, on déblaye rapidement l'accrochage, on répare la corde et on continue le poste de remblais ou de charbon.

Quand le puits ne descend pas plus bas que l'accrochage, un seul plancher est suffisant.

2° Les platelages des ateliers d'extracteurs de pierres ou ceux établis aux croisements des galeries souterraines. A la sortie des galeries ouvertes près de la surface et menant les remblais aux puits, il est nécessaire, la plupart du temps, de conduire les bennes à charger sur plusieurs points à la fois ; on y parvient au moyen de

platelages renfermant un grand nombre de voies; celui représenté par la *fig.* 8, Pl. I) permettrait de les conduire sur six points différents; il a 2 mètres sur 2 mètres, les feuilles de tôle ont encore $0^m,01$ d'épaisseur. Dans les travaux souterrains on s'attache à faire venir les convois jusqu'au puits; quand la galerie de roulage passe à peu de distance de ce dernier, on fait aboutir les voies à un platelage en tôle à six voies; quatre de ces voies appartiennent à la galerie sur le mur, les deux autres se dirigent vers l'accrochage.

3° Les platelages des traverses. Ils se composent (Pl. I, *fig.* 9) d'un châssis recouvert de planches de chêne, sur lesquelles est clouée une feuille de tôle d'un mètre de large sur $1^m,50$ de long et $0^m,005$ d'épaisseur. Cette feuille porte des amorces pour une seule voie; ces platelages sont posés à peu près jointifs à la voie de roulage établie dans la galerie du mur, et la plus voisine des traverses. Ils sont très-utiles pour faciliter le passage des bennes vides, ou pleines de charbon ou de remblais, de la traverse dans la galerie de roulage ou réciproquement.

Il suffit de les soulever à la main ou tout au plus en se servant d'un morceau de bois que l'on passe sous la caisse. Dès qu'une benne de remblais a deux de ses roues sur la tôle, elle est bientôt sur la voie de la traverse. Quant aux bennes pleines de charbon, il suffit de les enrayer sur la voie de roulage du mur, voisine du platelage; la manœuvre est plus facile que pour les remblais.

Les bennes vides ne présentent aucune difficulté, un seul homme les passe aisément.

Cette manœuvre des bennes de remblais et de charbon à l'entrée des traverses, se fait ordinairement par deux hommes; l'un d'eux dessert plusieurs traverses à la fois, c'est le sauteur de bennes, l'autre est le rouleur

qui amène la benne. Pour exécuter cette manœuvre, on a essayé de petites grues analogues à celles en usage dans les mines de Newcastle (1) ; l'avantage est demeuré aux platelages en tôle, il y a moins de temps perdu.

Après un temps très-court, tous ces platelages deviennent lisses par le frottement des boudins des roues, en sorte qu'un faible effort suffit pour les faire tourner, et l'enraillage se fait pour ainsi dire de lui-même. Ils remplacent très-avantageusement les plaques tournantes en usage dans les chemins de fer de la surface.

Appareil d'extraction.

Cet appareil se compose d'une charpente de molettes, de wagons plats receveurs des bennes, et d'une grille à bascule avec recette faisant suite aux wagons.

Charpente de molettes.

Dans un mémoire sur le fonçage des puits de mines dans le nord de la France (*voyez* le tome III de la 4e série des *Annales des mines*), j'ai donné le dessin d'une charpente à peu près semblable : mais celle qui nous occupe est établie sur des proportions beaucoup plus considérables (Pl. I, *fig.* 10, 11 et 12). Ainsi, les axes des molettes sont à 24m,40 au-dessus de la bouche du puits, les deux maîtres-montants ont 23m,10 de longueur sur 0m,45 d'équarrissage en haut. Chaque maître-montant est d'une seule pièce en sapin ; les liens de côté et de derrière peuvent être chacun de deux pièces ; ils sont aussi en sapin. Il ne serait guère possible de trouver des bois de chêne ayant ces dimensions, et d'ailleurs ils coûteraient fort cher. Tout le reste de la charpente est en chêne et facile à trouver, parce que toutes les pièces ont de faibles dimensions. Les tenons principaux sont renforcés par des armatures ou des boulons. Les porteurs de molettes sont liées au chapeau de la charpente par de forts étriers

(1) *Voir* le mémoire de M. Piot, *Annales des mines*, 4e série.

en excellent fer. Les molettes sont à gorge plate, capables de recevoir des câbles plats de $0^{m},16$ de largeur.

Les coussinets des molettes sont en fonte et bronze entièrement découverts; ils coiffent les porteurs de molettes avec lesquels ils sont boulonnés.

Ces charpentes sont remarquables en ce qu'elles renferment peu de bois relativement à leur hauteur et aux charges qu'elles supportent. La principale condition de stabilité est celle-ci :

La résultante générale des tensions des cordes, quand la machine travaille, doit passer entre le plan des liens de derrière et celui des maîtres-montants. Cette condition détermine la position des bobines et par suite celle de la machine d'extraction.

Quand elle n'est pas satisfaite, c'est-à-dire quand la résultante générale des tensions des cordes passe entre le plan des liens de derrière et les bobines, et surtout quand les maîtres-montants et liens de derrière sont faibles, la tête de la charpente oscille en avant et en arrière, à chaque coup de piston. Le mouvement est surtout sensible, quand l'ascension est rapide. Mais en donnant aux pièces des dimensions suffisantes, et disposant les bobines convenablement, ce mouvement est à peine sensible; on sent bien qu'il n'est jamais nul. Ceci est impossible à réaliser avec une pareille hauteur, mais un léger mouvement de va-et-vient ne nuit pas à la solidité de l'appareil.

Il faut avoir soin de mastiquer les fentes du bois et de les peindre, si l'on veut augmenter la durée des pièces en sapin.

Les convois de bennes sont reçus sur deux wagons plats mobiles à quelques mètres au-dessus de la bouche du puits d'extraction. Ces wagons (Pl. I, *fig.* 10 et 12) Wagons plats.

se composent d'un châssis recouvert de fortes planches de chêne, sur lesquelles sont clouées des feuilles de tôle de 0,01 d'épaisseur ; trois liteaux de 0,10 de hauteur sont boulonnés avec le châssis et ne laissent aux bennes qu'une issue vers la grille. L'ensemble est supporté par quatre coussinets en fonte qui viennent s'appuyer sur deux essieux mobiles. Les roues courent sur deux rails à champignons.

La manœuvre est facile à saisir ; les receveurs tirent ces deux wagons au-dessus du puits à tour de rôle, et suivant que le convoi de droite ou celui de gauche a dépassé le niveau de la recette. Ils sont d'ailleurs construits et posés de manière que leur bord sans liteau vienne affleurer le plancher de celle-ci.

Ces wagons sont extrêmement commodes pour recevoir les convois ; bouchant à peu près les deux tiers du puits, les ouvriers sont beaucoup moins exposés à tomber que lorsqu'ils sont obligés de tirer les bennes sur la recette, et de leur faire abandonner la verticale. En outre, les bennes vides poussées sur ces chariots et enlevées l'une après l'autre verticalement, se balancent moins dans le puits et y causent moins de dégâts.

Recette. Sur le bord du puits d'extraction on établit une charpente qui porte la recette ; celle-ci présente (Pl. I, *fig.* 12, 13, 14 et 15) un plancher de niveau et faisant suite aux wagons plats receveurs de bennes. Pour recevoir quatre bennes pleines, loger quatre bennes vides en attente, et ne pas être gêné dans ce service, il faut donner à ce plancher une largeur de 6 mètres sur une longueur de 5 mètres environ. Les *fig.* 12, 13, 14 et 15 représentent un plan et deux coupes en travers de cette recette ; sur les traverses fixées à la partie supérieure de la charpente on cloue de fortes planches de chêne, et par-dessus des feuilles de tôle de 3 mètres

de longueur sur une largeur de 1 mètre environ et une épaisseur de $0^{m},01$. Les têtes de clous doivent être noyées dans la tôle pour ne pas gêner le mouvement des bennes.

Une toiture légère en planches recouvre le tout, soit pour garantir les receveurs de bennes pendant le mauvais temps, soit pour supporter le choc d'un câble qui viendrait à rompre pendant les postes de charbon.

Ces bascules sont en fonte et fer. Elles se composent (Pl. I, *fig.* 10) de deux flasques en fonte, reliées par quatre fortes traverses en fer forgé sur lesquelles sont boulonnés : Bascule et grille.

1° En bas, deux rails mis au niveau du plancher en tôle de la recette; ils sont recourbés à l'une de leurs extrémités pour arrêter le mouvement des bennes; l'autre extrémité se raccorde avec des amorces en fer forgé, clouées sur les feuilles de tôle.

2° En haut, deux longrines en fer qui viennent raser les bords supérieurs de la benne pleine.

La traverse supérieure la plus voisine de la recette est recourbée en fer à cheval et dans sa partie moyenne, afin de laisser passer les gros morceaux de charbon; la traverse supérieure voisine de la grille est légèrement recourbée en son milieu pour livrer passage à l'oreille de la benne.

Cette bascule repose sur deux montants en chêne (faisant partie de la charpente de la recette et figurés dans la coupe *fig.* 15, Pl. I), au moyen des tourillons engagés dans les flasques. Les traverses en fer forgé sont tellement placées que le centre de gravité de la benne pleine, engagée sur les rails, se trouve à peu près au niveau de l'axe des tourillons, et un peu en avant du côté de la grille. Par suite, la bascule se met en mou-

vement d'elle-même dès que les roues de la benne viennent butter contre les arrêts fixés sur les rails; en aidant un peu, la benne se trouve à peu près complétement renversée, les roues en l'air. Elle est d'ailleurs retenue par les deux longrines en fer et les arrêts fixés sur les rails. Elle se vide donc, sans fatigue pour les receveurs et sans choc qui la brise. Deux heurtoirs en frêne, ou tout autre bois dur, sont boulonnés sur les deux flasques, et viennent butter contre le plancher de la recette, quand on retire la benne vide. Ces heurtoirs sont coupés de telle manière que les deux rails de la bascule se trouvent toujours de niveau avec la recette.

Ces bascules sont fort en usage dans les mines des environs de Saint-Étienne, qui emploient les bennes à roulettes. Elles facilitent singulièrement la manœuvre des receveurs, et conservent le matériel.

La bascule précédente est établie à la tête d'une grille ou crible qui classe les charbons en menus et gros. La tête de cette grille part de la naissance des rails de la bascule; elle affleure les flasques, afin que le charbon tombant d'une petite hauteur se brise le moins possible. L'écartement des barreaux de la grille est variable suivant l'état du charbon; quand il est humide, cet écartement est de $0^m,03$. Les deux qualités sont transportées à la brouette et déposées à la tête d'un mur de soutenement construit le long d'un embranchement du chemin de fer de Commentry à Montluçon, puis chargées à certaines heures dans les wagons de ce chemin de fer: leur capacité est de 20 hectolitres.

Cette grille peut être modifiée de manière à classer les charbons en plus de deux qualités. En faisant usage de wagons plus grands, on peut, au moyen de voies de fer dirigées convenablement, éviter le dépôt sur

les embarcadères. Ce dépôt augmente la proportion de menu et ne laisse pas d'être onéreux.

Ces dispositions doivent varier avec la qualité de houille, sa destination et le chemin de fer qui la transporte. Autant que possible, il faut s'attacher à n'avoir qu'un chargement dans les bennes, aux tailles, et un déchargement de ces mêmes bennes dans les wagons de transport.

Pendant longtemps on n'a employé à Commentry que des câbles ronds, en chanvre, et goudronnés. Une expérience de plusieurs années a démontré que ce genre de cordes dure beaucoup moins, à qualité, section et charge égales, que les câbles plats en chanvre ou en aloès. L'aloès vaut mieux dans les puits humides ; dans les puits secs, le chanvre dure à peu près autant. Ainsi, par exemple, deux cordes de $0^m,08$ de diamètre placées sur un des puits de Commentry n'ont servi que dix mois ; tandis que deux cordes plates, en chanvre, de $0^m,14$ de large et $0^m,035$ d'épaisseur, sortant de la même fabrique, durent près de deux ans, en faisant le même service. Les sections sont, dans ces deux cas : 30 et 49 centimètres quarrés. Malgré la différence du prix, la perte qui en résulte, dans une grande exploitation, peut être considérable. A quoi tient cette différence dans la durée des cordes plates ou rondes ? Sans doute au frottement des spires les unes contre les autres sur les tambours cylindriques ou coniques, tandis que sur les bobines les spires ne font que glisser insensiblement l'une sur l'autre, à mesure que le serrage s'opère. En outre, les câbles plats dont les torons sont cousus ensemble se détordent moins volontiers que les cordes rondes. Câbles.

Nous signalons cette différence dans la durée, parce

que beaucoup d'établissements houillers, en France, donnent encore la préférence aux câbles ronds.

Chaînes de suspension.

Les chaînes de suspension (Pl. II, *fig.* 1) se composent d'une espèce de fléau de balance, en gros fer plat, percé d'un trou circulaire en son milieu, et d'un autre trou circulaire à chaque extrémité. A chaque bout de ce fléau pend une longue chaîne portant de distance en distance un bout de chaîne assez court terminé par un long crochet recourbé qui vient saisir l'oreille de la benne de charbon ou de remblai. Ces bouts de chaîne sont ajustés de manière qu'ils peuvent se détordre sans que l'on soit obligé de modifier la position des chaînes maîtresses. Le fléau est saisi en son milieu par une chappe faisant partie d'une grosse chaîne, qui elle-même se rattache au câble plat. Toutes ces chaînes, grosses ou petites, doivent être à maillons très-courts, afin que jamais les maillons ne travaillent sur plat; dans ce cas, une rupture est imminente; le moindre choc peut déterminer la chute de tout ou partie du convoi.

Voici, pour un convoi de quatre bennes, comment ces chaînes doivent être établies :

On donne à la grosse chaîne-câble 8 mètres de longueur; on laisse un écart d'un mètre entre le fléau et la première benne, un écart de 2 mètres entre deux bennes consécutives.

Comme elles ont $0^m,85$ de hauteur, on voit que les chaînes des fléaux ont $9^m,55$ de longueur, soit en totalité $17^m,55$. Si on ajoute à ce chiffre la hauteur de la quatrième benne et celle de la grille qui est d'environ $3^m,20$, on obtient $21^m,60$. La différence de niveau entre les axes des molettes et la bouche du puits étant de $24^m,40$, il en résulte que lorsque la dernière benne viendra se présenter au niveau des wagons receveurs,

le point d'attache de la grosse chaîne et de la corde plate se trouvera à $2^m,80$ au-dessous de la molette. Cette distance est nécessaire, parce que le machiniste élève quelquefois les convois un peu plus haut qu'il ne convient, surtout pendant la nuit, et il ne faut pas que l'attache de la chaîne et du câble monte sur la molette. Quant aux 8 mètres de grosse chaîne, ils sont strictement suffisants pour empêcher la corde plate de se plier dans le fond du puits quand on reçoit les convois de charbon ou de pierres; cette condition est essentielle.

En effet, après un temps assez court, les cordes s'affaiblissent tellement à l'endroit des plis, qu'on est obligé de les couper; de là perte de matière et de temps, parce qu'il faut refaire l'attache du câble et de la chaîne. Or on sent combien le temps est précieux, lorsqu'il s'agit de faire travailler un puits d'extraction vingt à vingt-deux heures par jour, soit en charbon, soit en remblai. Les deux ou trois heures supplémentaires sont consacrées aux réparations de machines.

Les détails qui précèdent expliquent suffisamment comment on a été conduit à construire des charpentes si élevées. Un convoi de 4 bennes de charbon ou de pierres représente 13 à 14 hectolitres de houille et $1^{mc},32$ foisonnés; pour élever au jour ou descendre dans les travaux souterrains, de semblables poids et volumes, il faudrait des vases très-grands et très-solides; par conséquent très-difficiles à manœuvrer. Les bennes à roulettes, au contraire, sont d'une manœuvre facile: seulement en divisant les poids, elles ont conduit à donner une plus grande hauteur aux appareils d'extraction.

Les convois de charbon ou de remblais sont du reste faciles à mettre au puits; il suffit de placer les bennes

les unes à la suite des autres dans le sens de leur longueur, et de les accrocher toutes, puis de les pousser successivement vers le puits à mesure que le câble s'élève. La manœuvre est la même, soit au fond du puits, soit aux accrochages des remblais. Au jour, on les pousse sur les wagons plats que l'on repousse ensuite pour livrer passage au convoi vide.

De la charge des câbles plats.

La charge des câbles plats pendant les postes de charbon peut s'établir de la manière suivante :

	kil.
Une chaîne-câble de 8 m. de longueur et 0,03 de diamètre.	184
Un fléau à 4 bennes.	140
4 bennes vides.	652
14 hectolitres charbon.	1.120
Ensemble.	2.096

Ces câbles ont $0^{m},14$ de large sur 0,035 d'épaisseur, c'est donc 42 à 43 kilogrammes par centimètre quarré de section. Cette charge, pendant les postes de remblais, devient :

	kil.
Chaîne-câble.	184
Un fléau à 4 bennes.	140
3 bennes vides.	489
$1^{mc},32$ foisonnés ou $0^{mc},88$ massifs grès et schistes houillers (en admettant 2.000 kilogr. pour le poids spécifique moyen de ces roches).	1.760
Ensemble.	2.573

C'est donc 52 à 53 kilogrammes par centimètre quarré. Ainsi ces câbles travaillent vingt à vingt-deux heures par jour, sous une charge moyenne de 47 à 48 kilogrammes par centimètre quarré ; leur durée est de dix-huit mois à deux ans, suivant l'état des puits.

Bobines.

Ils s'enroulent sur des bobines entièrement en fonte

et fer ou à cerveaux en fonte avec rayons de bois. Les noyaux sont en fonte, les rayons en fer forgé boulonnés avec le noyau, les couronnes en fer mince et composées de plusieurs secteurs rivés sur les extrémités des rayons. Ce genre de bobines est inaltérable, mais il présente un inconvénient; quand les puits sont humides, il faut pour préserver les câbles les graisser de temps en temps, ce qui les rend glissants, surtout lorsqu'ils sont à demi usés. Les spires cherchent alors à s'appuyer sur les rayons, et à moins d'avoir une grande épaisseur, ceux-ci ne peuvent leur offrir un point d'appui suffisant. Dès lors ils peuvent se placer de champ et s'engager de manière à arrêter la machine. Cet effet ne se produit pas quand les câbles sont maintenus dans un état à peu près sec. Ces bobines sont du reste très-légères et conviennent sur les puits donnant peu d'eau.

Le deuxième genre ressemble à celui que j'ai donné dans le mémoire déjà cité, tome III de la 4ᵉ série des *Annales des mines;* seulement les bobines actuelles sont plus légères et renferment un plus grand nombre de rayons. Elles se composent, comme on le voit, d'un cerveau en fonte sur lequel sont boulonnés un certain nombre de rayons en bois terminés par une circonférence aussi de bois, formée de plusieurs secteurs fixés sur les extrémités des rayons par des vis à tête fraisée. Elles conviennent mieux que les premières sur les puits humides ; en effet, leurs nombreux rayons en bois présentent aux câbles vieux et bien graissés des points d'appui solides et rapprochés. Pour fixer les câbles plats sur ces bobines, on peut s'y prendre de plusieurs manières; une des plus simples consiste à fixer le câble au noyau par quelques fortes vis engagées dans la fonte.

Machines d'extraction.

La plupart des machines d'extraction de Commentry sortent des ateliers de M. Cavé. Elles sont à cylindre oscillant à double effet sans détente ni condensation; elles fonctionnent à 6 atmosphères. Les eaux de la mine étant très-acides, surtout après un séjour assez long dans les travaux souterrains, ne peuvent servir à l'alimentation des chaudières; une dérivation du ruisseau de la Banne, qui a servi en 1840 et 1842 à inonder la mine, fournit l'eau nécessaire. Cette eau est reçue dans un grand bassin, puis élevée dans une bâche en tôle d'un assez grand diamètre au moyen d'une pompe aspirante et foulante mise en jeu par une petite machine à vapeur. Cette bâche est établie à une certaine hauteur; une série de tuyaux en fonte enterrés à quelques pieds au-dessous du sol amène l'eau près des chaudières. Elle tombe dans des bâches en bois où elle est reprise par de petites pompes aspirantes et foulantes mises en jeu par des machines à vapeur spéciales et de faible puissance, dites petits-chevaux, et foulée dans les chaudières.

En hiver le ruisseau de la Banne fournit toujours assez d'eau, il n'en est pas de même en été. On a donc intérêt à la ménager dans cette saison.

Dès machines à condensation en auraient exigé beaucoup plus. Leur consommation en charbon est assez grande, mais on sait que dans une mine de houille on est souvent obligé d'élever au jour des rebuts invendables dont on ne saurait comment se débarrasser si les machines ne les consommaient pas.

Cependant s'il s'agissait d'établir sur cette mine une machine de grande puissance pour épuisement, par exemple, il faudrait par économie choisir une machine à détente et condensation, devrait-on pour cela faire quelques dépenses pour aménager les eaux. Ces ma-

chines d'extraction sont d'ailleurs bien exécutées ; en général elles occupent peu de place, sont faciles à conduire et se dérangent peu. Ceci est fort important quand le travail doit être pour ainsi dire continu. Les chaudières adoptées sont cylindriques, en tôle, terminées par deux calottes sphériques. Cette forme n'est sans doute pas celle qu'il faut adopter pour consommer le moins de charbon, mais elle est simple, permet de retourner les chaudières quand elles sont à demi usées d'un côté et de les réparer rapidement quand elles sont avariées.

Voyons quelle doit être la puissance à développer pour élever de 100 mètres, en neuf heures de travail effectif, 500 bennes de charbon.

Cela revient à élever 56 bennes par heure environ : comme les convois sont de 4 bennes, c'est quatorze voyages qu'il faut faire par heure ou un voyage par quatre minutes et demie. Pour mettre au puits un convoi de 4 bennes, le recevoir au jour et le renvoyer au fond, il faut à peu près deux minutes. Par conséquent l'ascension d'un convoi devrait se faire en deux minutes et demie.

En se rappelant que les bennes contiennent 3 1/3 hectolitres, que l'hectolitre pèse 80 kilogrammes environ, on trouvera que cette vitesse ascensionnelle exige une puissance de 9 à 10 chevaux-vapeur effet utile ; et si l'on admet que ces machines d'extraction n'utilisent au plus que les 0,55 de leur force nominale, il faudra 17 à 18 chevaux-vapeur effet dynamique.

Comme il est rare qu'une course de 500 bennes se fasse sans arrêt provenant du matériel ou du personnel du fond et du jour, et que l'on ne peut regagner le temps perdu que par un surcroît de vitesse ascensionnelle, il est prudent de compter sur 20 à 25 chevaux.

Freins sur les volants.

La descente des remblais par les machines d'extraction, après les postes de charbon, exigeait l'établissement de freins sur les volants ou sur des couronnes fixées sur l'arbre des bobines.

Un frein sur l'arbre des bobines arrête le mouvement des bennes, quel que soit l'accident survenu à la machine; sur le volant il sauvegarde plutôt la machine, puisque l'engrenage venant à se briser les bennes se trouvent abandonnées à elles-mêmes. Mais aussi, toutes choses égales d'ailleurs, il est beaucoup plus énergique; en renforçant les engrenages, il vaut donc mieux l'établir sur le volant.

Le frein proprement dit (Pl. II, *fig.* 2 et 3) se compose d'une lanière en fer plat ayant $0^m,12$ de large sur $0^m,01$ d'épaisseur vissée sur une série de sabots en bois dur de $0^m,12$ à $0^m,15$ d'épaisseur et une largeur un peu plus grande que celle de la jante du volant. Cette jante doit être de forme rectangulaire, bien circulaire et se maintenir dans un plan à peu près vertical, pendant le mouvement de rotation. L'une des extrémités de la lanière est saisie par un très-fort boulon filleté sur une assez grande longueur et qui traverse un sommier encastré dans les murs du bâtiment et à peu près jointif au volant. En serrant plus ou moins l'écrou qui termine ce boulon, on peut rapprocher les sabots de la jante du volant, au fur et à mesure qu'ils viennent à s'user. L'autre extrémité de la lumière est saisie par une forte chaîne passant sur une poulie en fonte et qui se rattache au petit bras d'un levier en fer plat de grande force établi près du volant; le grand bras de ce levier est commandé directement ou par l'intermédiaire de poulies ou de leviers de renvoi, suivant la disposition de la machine, par une vis à filets carrés se mouvant dans une colonnette en fonte bou-

lonnée sur le plancher de la chambre de la machine et à portée de la main gauche du machiniste, de façon qu'il puisse gouverner de la main droite et modérer le mouvement de la gauche en serrant plus ou moins le frein. L'écrou est engagé au sommet de la colonnette et ne tourne pas; la vis tourne et, par une disposition particulière, la chaîne qui la lie à l'extrémité du grand bras de levier ne peut se tordre.

Le pas de la vis, sa manivelle et le levier du frein étant en quelque sorte arbitraires, on comprend qu'il peut exercer sur la jante du volant une pression énorme, surtout si cette jante a un grand diamètre. Un excès de force n'est jamais à craindre; en effet, l'effort du machiniste se transmettant au levier du frein par l'intermédiaire d'une vis, le serrage est toujours progressif, quel que soit d'ailleurs la vitesse de rotation du levier de la vis; un manque de force, au contraire, pourrait dans certaine circonstance occasionner un ballage. L'un des convois de charbon ou de pierres serait précipité au fond du puits; l'autre arriverait à la tête de la charpente avec une grande vitesse et y causerait certainement des dégâts considérables. Dans l'établissement de ces freins, il faut supposer le cas le plus défavorable, celui où le convoi de charbon arrivant à la bouche du puits et le convoi de pierres étant suspendu et prêt à descendre, la machine viendrait à ne plus gouverner. Dans ce cas, le machiniste est surpris, et le plus souvent le convoi descend pendant quelques secondes avant qu'il ait serré le frein. Il faut que celui-ci soit assez énergique pour qu'un serrage progressif finisse par arrêter le mouvement après avoir au préalable amorti la vitesse acquise par les masses du convoi, des bobines et du volant. Des essais souvent répétés sur les convois de charbon ou de pierres nous ont

prouvé que le frein dont nous donnons le dessin satisfait à cette condition.

Ces appareils si simples sauvegardent toujours le matériel, mais leur importance devient extrême quand il s'agit d'un fonçage. Dans ce cas, si la machine devient ingouvernable pendant l'ascension ou la descente des ouvriers, ils redescendent de plein choc au risque de se tuer ou de se noyer au fond du puits. S'il s'agit de quelques réparations à faire au puits ou de descendre des hommes à fleur d'eau pour pêcher une benne ou même un noyé, le machiniste arrête indéfiniment au point voulu et rend l'opération plus facile.

Bâtiments de machines d'extraction.

Nous donnons ici le dessin d'un bâtiment pour machines d'extraction de 25 chevaux (Pl. II, *fig.* 2 et 3).

Le massif qui supporte le châssis en fonte de la machine et par suite le cylindre et la manivelle du volant doit être construit en pierres de taille de grande dimension. En effet, ce massif est traversé par une série de boulons verticaux destinés à assujettir le châssis, et l'on sent qu'une fixité absolue est indispensable.

Les massifs qui portent les bobines et le volant doivent être aussi en pierres de taille par le même motif. Le reste du bâtiment peut être construit en moellons ou en briques. La construction des bâtiments de machines d'extraction doit être subordonnée à cette condition importante et qui a beaucoup d'influence sur le service des puits; c'est que le machiniste doit apercevoir de sa place habituelle, non-seulement les deux convois de charbon à leur arrivée au jour, mais aussi toute la charpente, depuis la bouche du puits jusqu'aux molettes.

Suppression des engrenages.

Les engrenages, même renforcés, peuvent se briser par suite d'un choc brusque; il en résulte une perte

d'argent et des retards dans le service des puits, toujours préjudiciables dans une grande exploitation.

On peut les supprimer en établissant les bobines sur l'arbre du volant suffisamment prolongé. On sait que le travail moteur développé par un volant est proportionné au poids de sa couronne et au carré de la vitesse moyenne de celle-ci. Pour diminuer son poids, il est convenable que cette vitesse soit assez grande; ceci est nécessaire afin que la manivelle puisse franchir les points morts et que le mouvement de rotation ait un certain degré de régularité. Pour éviter une trop grande vitesse ascensionnelle des convois de charbon ou de remblais, il faut donc réduire le noyau des bobines; en cloisonnant les puits, cette vitesse peut d'ailleurs être assez grande sans inconvénient.

Un autre système consiste à faire mouvoir l'arbre des bobines au moyen de deux machines dont les puissances réunies égalent celle nécessaire pour produire l'effet désiré. Dans ce cas les bobines se trouvent placées entre les cylindres; les deux manivelles sont attachées aux deux extrémités de l'arbre et font entre elles un angle droit; en installant sur l'arbre des bobines, à égale distance de chacune d'elles, un volant d'un poids et d'un rayon modérés, on parvient aisément à franchir les points morts et à régulariser le mouvement de rotation : ceci est une conséquence de l'établissement à angle droit de deux manivelles motrices. Ce volant reçoit un frein qui a cet avantage de commander à la fois la machine et les bobines.

Nous n'avons vu aucun de ces deux systèmes installés à Commentry, mais nous savons que le deuxième fonctionne dans une des grandes exploitations du nord de la France.

Du fonçage des puits.

Suivant l'usage du pays, les premiers puits de Commentry étaient rectangulaires; en moyenne ils avaient $2^m,80$ de longueur et $1^m,60$ de large. Ces dimensions pouvaient suffire au passage de tonneaux de 6 hectolitres; elles étaient trop faibles pour des convois de bennes. On les a donc agrandis en adoptant la forme circulaire; aujourd'hui ces puits ont en moyenne 3 mètres de diamètre.

Leur fonçage ne présente en général de difficultés que lorsqu'ils donnent beaucoup d'eau; dans la partie centrale de la couche, où la puissance est la plus grande, les roches et le charbon sont fissurés et livrent volontiers passage à l'eau. Là quelques puits donnent à certaines profondeurs, principalement dans le voisinage de la couche, jusqu'à 16 tonnes de 6 hectolitres par heure et même davantage; au delà de ce chiffre, on suspend le fonçage et l'on bat les eaux pendant un certain temps; puis les ouvriers rentrent jusqu'à ce que leur affluence les oblige de nouveau à sortir. Heureusement ces puits sont rares; leur fonçage devient alors fort coûteux; surtout quand il s'agit de descendre dans une roche dure, comme le poudingue qui sert de base au terrain houiller. Dans ce cas, les postes de mineurs sont de quatre hommes, deux ne font que charger l'eau, les deux autres percent les trous de mine et mettent le feu.

Il est fort rare qu'ils soient obligés de se servir de cartouches en fer-blanc ou goudronnées: ils emploient communément et toujours les mèches anglaises dites fusées de sûreté.

Dans les parties qui exigent un revêtement, on muraille avec du grès houiller pris dans les travaux à ciel ouvert; on choisit les bancs les plus durs. Mais ces grès sont en général assez tendres, et lorsqu'il faut re-

vêtir certaines parties qui fatiguent plus que d'autres, telles que les accrochages et les bouches des puits, il vaut mieux cuveler suivant la méthode flamande. Une ou deux trousses colletées suffisent pour porter le poids du cuvelage et même plusieurs mètres de maçonnerie, en supposant qu'il y en ait au-dessus.

Les trousses ordinaires sont ensuite montées et serrées fortement par divers matériaux, tels que coins de bois et moellons bruts que l'on tasse fortement entre les parois du puits et les pièces de cuvelage.

Cette précaution est indispensable pour empêcher celui-ci de se déformer sous le choc des bennes.

Le nombre des pièces qui composent les trousses est très-variable; moins il y en a et plus aisément elles se posent, mais leur épaisseur doit être grande; en outre, plus il y a de pièces, plus on approche de la forme circulaire et mieux se fait le raccord du cuvelage avec la maçonnerie ou les parois brutes du puits.

On varie depuis 10 jusqu'à 15 pans; une épaisseur de $0^m,08$ à $0^m,10$ est alors suffisante. Comme il ne s'agit pas ici de retenir les eaux, mais de s'opposer seulement à la poussée du terrain, ces cuvelages peuvent être travaillés grossièrement et avec du bois ordinaire.

Comme exemple assez curieux de cuvelage, nous donnons le dessin (Pl. II, *fig.* 4, 5) d'un accrochage ouvert dans des schistes houillers très-tendres; à l'entrée de cet accrochage on avait à établir un cadre de grandes dimensions. Ce cadre se raccorde avec les pièces d'un cuvelage à 10 pans qui viennent s'appuyer contre les deux montants, tandis que la sole du cadre repose sur les trousses colletées et que sa tête porte le reste du cuvelage.

Pour ménager le matériel, il faut avoir soin de faire disparaître au pic et à la pointerolle toutes les aspérités

trop saillantes qui, rencontrées par les convois de bennes, pourraient les endommager ou les renvoyer vers le centre du puits et les faire osciller. Il faut autant que possible que les convois montent d'à-plomb.

Échelle de sauvetage.

Dans un puits en fonçage de 3 mètres de diamètre et donnant 16 tonnes d'eau de 6 hectolitres par heure, l'eau monte de 1m,36 par heure quand on suspend l'épuisement. Ce puits étant desservi par une machine à vapeur, si elle devient ingouvernable pendant un poste de mineurs et que la réparation exige un certain temps, ils seraient noyés avant qu'on ait eu le temps d'établir sur le puits, surtout s'il est déjà profond, un autre moteur. Il faut donc avoir sous la main un agent de sauvetage facilement et rapidement transportable.

On a établi pour cet usage à Commentry une échelle à montants en corde de 0m,03 à 0m,04 de diamètre et à bâtons de bois engagés solidement dans les montants. Cette échelle a une longueur plus grande que celle à laquelle le puits doit atteindre. On la tient toute prête sur un petit camion à deux roues, et, en cas d'accident survenu à la machine, le camion est amené sur le puits; et l'échelle une fois amarrée aux montants de la charpente des molettes, on la laisse couler jusqu'au fond. Dès lors les mineurs en partie submergés peuvent remonter jusqu'à la bouche du puits tous à la fois, ou s'arrêter en chemin, jusqu'à ce que la machine mise en état puisse venir les prendre. Cet appareil est fort simple; nous l'avons vu fonctionner plusieurs fois avec succès.

Cloisons séparatrices.

Les puits d'extraction ainsi exécutés peuvent être mis en exploitation et recevoir des convois de 4 bennes charbon ou remblais.

Pour éviter les rencontres au milieu des puits et augmenter sans danger la vitesse ascensionnelle, il con-

vient de les séparer en deux compartiments par une cloison verticale passant par l'axe et perpendiculaire au plan des câbles.

Les principaux puits d'extraction sont accompagnés d'une série de petits burcs verticaux de 20 mètres de longueur sur 1m,60 et 1m,10. Ces petits burcs, établis à peu près comme en Flandre (*voyez* le mémoire déjà cité), reçoivent des échelles inclinées à montants en chêne et goujons en fer forgé; au milieu de chaque petit burc se trouve un plancher de repos, de sorte qu'un ouvrier ne peut tomber que de 10 mètres. Ces échelles servent principalement à la descente et à la remonte des ouvriers, le passage par les puits d'extraction étant complétement interdit. Descenderies.

Les bâtons en bois, même le plus dur, ne conviennent pas dans les jeux d'échelles fréquentés, ils sont fort souvent la cause d'accidents graves. Les bâtons en fer durent fort longtemps; seulement les eaux sont tellement acides que, si l'on n'a pas la précaution de détourner les gouttières dans les burcs humides, ils sont assez vite rongés.

Dans les travaux souterrains de Commentry l'air n'est vicié que par la respiration des hommes et des chevaux, par la combustion des lampes et par les miasmes dus à la présence d'un nombreux personnel; l'acide sulfureux provenant de la combustion de la poudre et l'hydrogène sulfuré de la décomposition des pyrites y sont en petites quantités. L'airage y est donc fort simple; chaque niveau est exploité par un puits au moins, et tous les niveaux communiquent entre eux par un certain nombre de burcs verticaux ouverts, la plupart du temps, dans le charbon. Les galeries de roulage, les traverses et les galeries en dépilage ayant de grandes dimensions, on aère facilement chaque De l'airage.

étage par des burcs espacés de 150 à 200 mètres communiquant avec l'étage supérieur ou inférieur.

Dans la partie est de la couche, dont l'exploitation doit être poursuivie assez loin sans percement nouveau, on a eu recours, pour aérer deux étages superposés, à un moyen artificiel, je veux parler d'un foyer d'airage. Il est établi dans le toit de la couche, au niveau supérieur à 15 mètres environ d'un ancien puits communiquant avec la surface. La réunion du foyer et de ce puits a lieu par un burc vertical et une galerie horizontale. Au moyen de portes convenablement disposées et de burcs verticaux ou inclinés ouverts dans le charbon, et mettant les deux étages en communication, l'air parcourt en ce moment 1.500 mètres avant d'arriver au foyer. En cloisonnant le puits, on a même pu y placer un jeu d'échelles, de sorte qu'il sert tout à la fois de descenderie et de passage pour la fumée et l'air chaud du foyer.

L'air de ces deux étages est toujours bon, et il est probable qu'à l'aide de ce moyen artificiel on marchera longtemps vers l'*est* sans percement nouveau. Dans l'exécution de certains travaux au rocher, notamment des galeries de roulage destinées à mener les remblais aux puits d'extraction, on a dû avoir recours aux ventilateurs soufflants et aspirants; mais ces travaux avaient peu d'importance comparée aux étages en exploitation.

De l'épuisement. La mine de Commentry fournit 12.000 à 15.000 hectolitres d'eau par jour, suivant les saisons. Cette masse d'eau s'épuise en ce moment à l'aide de deux machines d'extraction menant des tonnes. Ce mode d'épuisement est provisoire; avant peu on établira une machine d'épuisement sur le pendage de la couche; les pompes seront descendues à un niveau inférieur, au niveau le

plus bas en exploitation, de manière à se créer un long avenir.

Revenons à l'épuisement par tonnes; il s'exécute, comme nous venons de le dire, par deux machines d'extraction, l'une de 45 chevaux, l'autre de 14 chevaux.

La première tire de 100 mètres, elle conduit des tonnes de 15 hectolitres : en marchant à grande vitesse, elle peut faire quarante-deux voyages à l'heure; mais pour éviter les accidents et conserver le matériel, il ne convient pas d'en faire plus de trente-cinq. Chaque voyage exige alors 1′ 43″. Il faut environ 15″ pour vider la tonne pleine, en sorte qu'il reste pour l'ascension 1′ 28″. Or 15 hectolitres élevés de 100 mètres en 1′ 28″ constituent un effet utile de 23 chevaux environ; et en adoptant 0,55 pour le coefficient de réduction du travail moteur développé par ces machines d'extraction, on obtient un effet dynamique de 42 chevaux; on est donc bien près de la force nominale: cette machine travaillant vingt heures par jour peut élever 10.500 hectolitres d'eau. Pour produire cet effet dans vingt heures de travail, il faudrait une machine d'épuisement de 30 chevaux.

La deuxième machine d'extraction tire à 90 mètres et conduit des tonnes de 10 hectolitres. Il ne convient pas qu'elle fasse plus de vingt-trois voyages; ce qui donne dans vingt heures 4.600 hectolitres. Pour produire cet effet dans le même temps, il faudrait une machine d'épuisement de 11 chevaux; ainsi les 59 chevaux d'extraction se réduiraient à 41 chevaux d'épuisement.

En outre, le personnel des receveurs de tonnes, machinistes et chauffeurs est beaucoup plus nombreux que celui nécessaire à une machine d'épuisement; l'usure des tonnes et des câbles est considérable. Les pertes d'eau pendant l'ascension sont fréquentes, elles pro-

viennent souvent de la présence d'un corps étranger interposé entre le fond des tonnes et les bords des soupapes; ces machines d'extraction consomment beaucoup plus de charbon qu'une machine d'épuisement à détente et à condensation.

Une foule de considérations doivent donc faire repousser ce mode d'épuisement quand il s'agit d'élever des masses d'eau aussi considérables, et il n'existerait plus en ce moment à Commentry, si les événements n'avaient fait ajourner la dépense importante d'une grande machine d'épuisement faisant marcher des pompes.

Quant au mode actuellement employé, comme il peut convenir dans le cas où il n'y aurait que peu d'eau à tirer, nous allons exposer brièvement ce qui a été fait à Commentry pour l'améliorer autant que possible.

Des tonnes à eau. Les tonnes menées par la machine de 45 chevaux contiennent 15 hectolitres; voici leurs dimensions prises en dedans (Pl. II, *fig.* 6 et 7) :

	mètres.
Hauteur.	2,11
Diamètre à chaque base.	0,85
Diamètre au ventre.	1,05
L'épaisseur des douves est de. .	0,03

Elles sont cerclées en fer plat de $0^m,08$ de large et 0,006 d'épaisseur posé à chaud. Ces cercles sont fixées sur bois par des boulons à tête fraisée dont les écrous sont en dedans de la tonne. La base supérieure porte intérieurement un cercle plus épais; il en est de même du ventre. Comme le pied des douves est maintenu par le fond, on voit qu'elles ne peuvent rentrer par suite d'un choc latéral; elles doivent rompre plutôt entre le fond et le cercle du ventre, ou entre celui-ci et le cercle de la base supérieure. Le fond de la tonne se compose d'un premier lit en plateaux de chêne de $0^m,06$ d'é-

paisseur, engagés dans une rainure ouverte dans les douves, d'un deuxième lit en planches affleurant le pied de celle-ci, et d'un troisième lit en planches recouvrant le tout, même le pied des douves, afin de les préserver de toute usure. Pour achever de les garantir, on cloue jointifs au pied de ces douves, et extérieurement deux cercles plus épais que les autres; quatre fortes oreilles sont fixées à la partie supérieure et saisies par deux chaînes dont les anneaux viennent passer dans le crochet de la chaîne-câble. Le câble plat est toujours terminé par une grosse chaîne assez longue pour qu'il ne trempe pas dans le puisard. Sous le fond de la benne sont boulonnées deux fortes traverses en fer plat; elles sont recouvertes par deux bandes de fer feuillard épais clouées sur les douves. Ces bandes de fer portent à peu près à elles seules le poids de l'eau contenue dans la benne.

Celle-ci se vide au moyen d'une soupape de $0^m,50$ de diamètre, pratiquée dans le fond. Cette soupape peut être faite d'un bloc de bois dur, cerclé en fer. Elle est traversée par une forte tige guidée en haut et en bas par deux traverses boulonnées avec les douves. Le fond de la benne est raboté intérieurement aux approches de la soupape; cette dernière est garnie de crin recouvert de cuir fort, bien cloué, et formant un bourrelet élastique dont l'application sur le fond de la benne, sous l'influence du poids de l'eau, s'oppose aux fuites.

Quand cette garniture de soupape est bien faite, elle dure assez longtemps.

On peut aussi faire usage de soupapes en fonte (Pl. II, *fig.* 8) présentant un bourrelet étroit à leur partie inférieure; ce bourrelet vient s'appliquer sur un cuir épais, annulaire, cloué sur le fond de la benne. Ces dernières sont indestructibles, tandis que les sou-

papes en bois, bien que faites en bois dur choisi et d'assez grande épaisseur, finissent toujours par se fendre et se briser à la longue.

Les détails qui précèdent paraissent superflus au premier abord, et cependant il est plus difficile qu'on ne saurait le croire de confectionner des tonnes d'aussi grandes dimensions et de manière :

1° Qu'elles durent longtemps;

2° Qu'elles gardent toute leur eau pendant l'ascension;

3° Qu'elles se vident très-rapidement.

Le mode de ferrage indiqué plus haut est une garantie de durée; les soupapes en bois à bourrelets de cuir et crin et les soupapes en fonte gardent bien l'eau, quand les garnitures sont faites avec soin; enfin ces soupapes ayant un grand diamètre, la benne est à peine posée qu'elle est vide; le machiniste n'a que le temps de retourner la machine pour élever une autre benne.

Diminuer le temps de la vidange est une chose très-importante en pareil cas, puisque l'effet utile de la machine augmente d'autant.

Wagons à eau. Ces wagons (Pl. II, *fig.* 9 et 10) se composent d'un châssis renforcé par une croix de Saint-André et recouvert de forts plateaux formant côtés; il en résulte une espèce de caisse à trois faces; le côté vide sert de passage à l'eau. Sur le fond on boulonne deux plateaux posés de champ et servant d'appui à un certain nombre de barres de fer rond de $0^m,05$ à $0^m,06$ de diamètre, engagées dans les côtés du wagon. Ces barreaux sont établis à une certaine hauteur au-dessus du fond. L'ensemble repose (Pl. II, *fig.* 11 et 12), par des coussinets en fonte, sur de très-forts essieux mobiles, et clavetés à des roues en fonte courant sur un chemin de fer établi à la bouche du puits d'épuisement. A droite

et à gauche de ce puits se trouvent deux recettes pour recevoir les eaux. Ces recettes et leurs parois verticales sont en bois de chêne, les conduites d'eau peuvent être en briques, ou les radiers et les parois en briques et le dessin en planches. On leur donne, tout aussi bien qu'aux recettes, une assez forte pente, afin que l'eau y séjourne le moins longtemps possible. Le jeu de l'appareil est facile à saisir; quand la tonne vient se poser sur les barreaux du wagon, le guide de la soupape porte sur le fond, cette soupape se lève et la tonne se vide immédiatement. On la relève et on repousse le wagon qui achève de se vider en regagnant sa place à côté du puits. Ce mouvement est très-rapide quand le personnel est habitué. Il va sans dire qu'il faut un wagon pour chaque tonne.

A 3 ou 4 mètres au-dessus du fond du puits, il faut ouvrir dans le charbon ou le rocher un réservoir (Pl. II, *fig.* 13 et 14) assez vaste pour contenir toute l'eau affluente pendant un jour ou deux; cette précaution est surtout indispensable quand le puits d'épuisement doit assécher des travaux d'exploitation situés à un niveau supérieur. En effet, le matériel peut avoir besoin de réparations, et l'eau s'élèverait beaucoup trop vite dans le puits. **Réservoir.**

L'entrée de ce réservoir est assez petite, afin que les tonnes ne puissent pas s'y loger: $1^m,50$ de large sur autant de hauteur. On pousse une galerie de quelques mètres, sur ces dimensions, dans le sens perpendiculaire au plan des câbles; puis on élargit. Si l'on se trouve dans le charbon, on exécute une série de galeries ordinaires ayant 3 mètres de long sur $2^m,30$ de hauteur; si c'est dans le rocher et qu'il soit dur, on ouvre une large galerie de 4 à 5 mètres sur 2 mètres de hauteur.

L'entrée du réservoir est fermée par un châssis à

barreaux de fer surmonté de madriers encastrés dans les parois de la petite galerie. Cette espèce de porte ne permet pas aux tonnes de pénétrer dans le bassin, et à travers la grille il ne passe que des bouts ou des morceaux de charbon peu volumineux. Le bassin peut donc fonctionner pendant très-longtemps sans nettoyage; or celui-ci ne pourrait se faire sans arrêter l'épuisement. C'est surtout dans ces puits d'épuisement que les câbles plats en aloès rendent de très-grands services; quelque soin que l'on apporte à la confection des tonnes à eau, il est impossible d'empêcher absolument toute fuite à travers ces larges soupapes; le puits est donc toujours très-humide, et des câbles en chanvre feraient certainement un moins bon usage.

Résumé. Les méthodes et appareils que nous venons de décrire sont applicables à toutes les couches de houille puissantes, quelle que soit leur profondeur au-dessous de la surface. Dans les mines profondes exploitées par remblais complets et dépilages, on ouvre ordinairement dans le toit de la couche et de distance en distance des galeries à travers bancs; puis à l'extrémité de ces galeries des chambres d'emprunt qui doivent fournir les matériaux nécessaires au remblayage des excavations pratiquées dans la houille. Ces chambres sont complaisantes, c'est à-dire que les matériaux se présentent toujours d'eux-mêmes à l'entrée des galeries à travers bancs, et alors ils sont le plus souvent de petit échantillon, ou bien il faut pénétrer dans leur intérieur pour provoquer de nouveaux éboulements. Dans le premier cas on consomme beaucoup de bois, en vue de lier et de consolider les remblais; dans le deuxième, les ouvriers chargés de l'approvisionnement en remblais sont toujours en danger. Dans les deux cas

ces vastes chambres provoquent, dans le terrain houiller, des tassements considérables qui peuvent à la longue compromettre les constructions, chemins et cours d'eau de la surface.

Dans le système appliqué à Commentry, la masse de pierres que l'on peut se procurer par jour est à peu près arbitraire; on obtient des matériaux de tout échantillon, ce qui facilite singulièrement la construction des murs de soutenement dans les chantiers de dépilage et épargne beaucoup de bois. Dans un terrain houiller ordinaire exploité à ciel ouvert, il est rare que l'on ne puisse se procurer, avec quelques précautions dans l'abatage de la roche, un tiers de gros, et nous avons vu que cette proportion est suffisante. Les extracteurs ne sont exposés à aucun danger, si ce n'est ceux attachés au métier de carrier; la surface du sol n'est affectée que par les tassements provenant des dépilages, et ces tassements s'exécutent d'une manière insensible comparés à ceux qui peuvent être occasionnés par des chambres d'emprunt fournissant par année des masses énormes de pierres.

Le nombre de bennes de remblais à introduire par poste dans les travaux souterrains ne dépend que de la force des câbles et chaînes de suspension et de la puissance du moteur; en effet, avec l'aide d'un frein très-énergique, on peut envoyer de l'accrochage supérieur et recevoir à l'accrochage inférieur des convois composés d'un nombre de bennes presque arbitraire. Par suite, en établissant des charpentes de molettes assez fortes et assez hautes, on peut élever par voyage un nombre proportionné de bennes de charbon.

Pour activer leur déchargement, on agrandirait les recettes et on multiplierait les bascules. Comme il serait difficile de se procurer des pièces plus longues et

plus fortes que les maîtres montants de la charpente de molettes décrite précédemment, on pourrait établir à la bouche des puits d'extraction des murs de soutènement élevés et d'une épaisseur proportionnée et poser la charpente sur ces murs, ou bien augmenter la vitesse ascensionnelle des convois, ce qui aurait peu d'inconvénients en faisant usage de cloisons séparatrices.

On est donc maître en quelque sorte de développer à son gré la production.

CHEMINS DE FER D'ANGLETERRE EN 1851.

RAPPORT

ADRESSÉ A M. LE MINISTRE DES TRAVAUX PUBLICS,

Par M. LE CHATELIER, ingénieur en chef des mines.

DEUXIÈME PARTIE.

MATÉRIEL ROULANT.

La publication récente du *Guide du mécanicien*, à laquelle j'ai pris part avec MM. Flachat, Petiet et Polonceau, me dispense d'entrer dans des développements très-circonstanciés sur les détails de construction de l'élément principal du matériel roulant, la machine locomotive. Il n'y a pas eu de progrès très-notables depuis quelque temps dans la disposition même des pièces mécaniques; les questions à l'ordre du jour sont particulièrement la combinaison de ces divers organes dans le cadre étroit où se trouve renfermé le constructeur, et l'agencement de toutes les parties, pour obtenir un accroissement de puissance et des conditions de marche favorables à la grande vitesse ou au transport de masses considérables.

Pour les wagons, ce sont également des questions de même nature qui préoccupent les ingénieurs anglais; on cherche à obtenir des véhicules stables et d'une marche sûre, non-seulement quant aux risques que les

voyageurs peuvent courir, mais encore pour la régularité du service.

C'est surtout pour les questions qui se rattachent au matériel roulant qu'on remarque en Angleterre, comme partout ailleurs, dans le personnel des ingénieurs, l'absence de vues d'ensemble et de principes généraux; chacun travaille de son côté et sur son propre fonds d'imagination et d'expérience. Cependant on voit de temps en temps certaines opinions prévaloir, réagir pendant un temps sur la construction du matériel et tomber ensuite dans le discrédit pour faire place à un système diamétralement opposé; ces revirements d'opinion sont la meilleure preuve de l'absence de principes et s'expliquent par le peu d'intérêt que les ingénieurs-mécaniciens attachent en général à l'élément théorique dans leurs travaux de construction. On peut citer parmi ces revirements d'opinion la question des machines à cylindres intérieurs et extérieurs, celle de la hauteur du centre de gravité, etc.; maintenant encore on ne recule devant aucune objection pour augmenter la dimension des foyers et de la surface de chauffe, on augmente indéfiniment l'écartement des essieux extrêmes, on élève constamment la pression dans les chaudières; il y aura un jour ou l'autre une réaction qui pourra être aussi peu modérée dans ses écarts que l'impulsion à laquelle tout le monde s'abandonne aujourd'hui.

En France, nous avons eu le tort jusqu'ici de suivre aveuglément la pratique ou le plus souvent la mode anglaise; et lorsque nos ingénieurs envoyés au delà du détroit sont tombés dans un mauvais moment, il leur est arrivé de rapporter des modèles défectueux qu'on a imités quand même sur la plus vaste échelle. On a déjà expérimenté à peu près sous toutes leurs faces

les questions qui se rattachent à la construction du matériel roulant ; il serait bon maintenant de jeter un regard en arrière et de porter quelque jour, par la discussion des divers systèmes, sur les règles qu'il est certainement possible d'établir dans la construction des machines et des véhicules.

Deux points importants peuvent être considérés comme réglés, la stabilité propre des machines et la construction des ressorts ; le mode de chargement du combustible dans les foyers est également une question qui pourra être considérée comme réglée lorsque les expériences qui sont faites sur divers chemins seront suffisamment complètes. Diverses questions sont à l'étude, particulièrement celle de l'entraînement et de la condensation de l'eau dans les cylindres, celle de la construction de la coulisse de Stephenson (1), etc. Mais il en reste plusieurs autres sur lesquelles des expériences rationnelles pourraient jeter un grand jour ; en première ligne on peut citer la proportion à établir entre les diverses parties du foyer entre elles et avec les cylindres, l'étude des meilleurs moyens d'attache des véhicules entre eux, la limite de charge que l'on peut faire supporter aux rails par une seule paire de roues, etc. Ces recherches deviendraient faciles et pourraient être exécutées de manière à donner des résultats décisifs, si tout le monde était bien pénétré de leur incontestable utilité.

§ 1er. *Machines locomotives.*

Les machines locomotives que l'on voit sur les che-

(1) Le travail de M. l'ingénieur des mines Phillips, dont il sera question plus loin, a été terminé postérieurement à la rédaction de ce qui précède.

mins de fer anglais appartiennent à des types très-divers. Presque toutes celles que l'on construit actuellement sont à cylindres intérieurs, qu'elles soient destinées au service des voyageurs ou qu'elles le soient à celui des marchandises; on n'avait d'ailleurs placé les cylindres extérieurement pour ces dernières que dans un nombre de cas assez restreint. Sur quelques chemins seulement on a persisté dans l'emploi des machines à cylindres extérieurs pour le service des voyageurs, même pour les grandes vitesses; dans ce cas les machines sont établies suivant le type introduit en France et maintenu avec persévérance par M. Buddicom, type dans lequel l'emploi d'un double bâti donne une grande solidité aux cylindres. Les machines à roues indépendantes et à cylindres intérieurs sont établies le plus généralement sur un type dérivant plus ou moins directement de l'ancienne machine de Sharp et Roberts. Les machines à marchandises à cylindres intérieurs construites il y a quatre ou cinq années sont semblables au ***Mammouth*** du chemin de fer de Paris à Orléans, et ont les trois essieux accouplés et intercalés entre la boîte à feu et la boîte à fumée; dans celles que l'on construit maintenant on a fait passer l'essieu d'arrière au delà du foyer, en même temps que celui-ci a été allongé, sans que l'on ait craint d'augmenter dans une proportion considérable l'écartement des supports extrêmes, et en même temps on a placé généralement les longerons en dehors des roues, ce qui a reporté encore au delà les bielles d'accouplement qui se trouvent maintenant écartées de $2^m,40$ à $2^m,50$ d'un côté à l'autre. Partout on s'est appliqué à augmenter la surface de chauffe en agrandissant le foyer et en multipliant les tubes; enfin on a porté la pression à un degré très-élevé sans augmenter l'épaisseur du métal des chaudières, en ayant

soin seulement de consolider plus fortement les parois planes.

1° Poids des machines.

Les ingénieurs sont partagés sur la question du poids à donner aux machines ; les uns ne craignent pas d'augmenter presque indéfiniment ce poids, tandis que les autres s'appliquent au contraire à le réduire le plus possible ; mais en général les discussions auxquelles se livrent les partisans des deux systèmes sont peu instructives, car les uns font abstraction de l'usure de la voie qui est incontestablement aggravée par des poids excessifs et surtout mal répartis ; tandis que les autres font bon marché des frais d'exploitation, que la multiplicité des convois, ou la nécessité d'employer dans beaucoup de cas deux machines au lieu d'une seule, doit nécessairement aggraver. Avant toute discussion sur cette question, il serait nécessaire de rechercher le rapport qui existe entre la résistance des rails et les poids qu'on leur fait supporter en ayant égard à leur nature (forme, dimension et qualité du métal), au diamètre des roues qui transmettent la charge et à la vitesse. Une étude attentive des faits que l'on peut observer sur un assez grand nombre de chemins de fer ayant des rails de forme et de provenances diverses, des machines de systèmes différents, et où l'on a constaté avec plus ou moins d'attention les effets produits par l'augmentation successive du poids des machines et par l'accroissement de la vitesse, des expériences faites en vue de déterminer à quelle limite de poids et de diamètre pour les roues la surface des rails éprouve une déformation sensible, quelle limite atteint la flexion statique des rails et celle qui résulte de la vitesse de circulation sur les voies de différents systèmes, et jusqu'à quel point cette flexion peut altérer la résistance des

rails et déterminer leur rupture ou leur désagrégation, l'étude de l'influence résultant du soin plus ou moins grand avec lequel les roues sont mises sur le tour et ramenées au profil normal pour la conservation réciproque des rails et des bandages, etc., la constatation en un mot de tous les résultats acquis par l'expérience, donnerait des indications précieuses qui, discutées avec soin, conduiraient certainement à la solution pratique de la question; mais jusque-là tout ce que l'on pourra dire en pareille matière ne sera qu'une affaire d'appréciation et de sentiment, surtout si, comme cela a lieu trop souvent, on ne se préoccupe que du poids total des machines sans avoir égard à la répartition de ce poids sur les supports.

Les machines que l'on construit actuellement en Angleterre, pour la voie étroite, pèsent de 25 à 30 tonnes, chargées d'eau et de coke; sur le Great-Western, et dans quelques cas exceptionnels sur la voie étroite, le poids des machines est de 35 à 36 tonnes, mais alors elles sont montées sur huit roues. Le poids pour l'essieu moteur, au contact des rails, est ordinairement limité à 12 ou 13 tonnes et n'atteint que par exception la limite de 14 tonnes. Les partisans exclusifs des machines légères cherchent à réduire à 10 ou 12 tonnes le poids total, mais des machines de cette dimension ne peuvent réellement convenir que pour un petit service d'embranchement ou de banlieue. L'influence destructive que les machines lourdes peuvent exercer sur les rails dépend d'ailleurs de leur mode de construction et de leur état d'entretien.

En se bornant à une simple appréciation, la seule chose possible dans l'état actuel des choses, on peut admettre qu'un poids de 5 tonnes au contact de chaque roue sur le rail, pour des rails de 35 à 40 kilogrammes

par mètre courant, sur une voie bien posée et soustraite aux effets de la flexibilité, se trouve dans de bonnes conditions pour la conservation de la voie et des bandages, et que l'on peut en conséquence atteindre pour les machines à marchandises le poids total de 28 à 30 tonnes, et pour les machines à voyageurs, dans lesquelles l'une des paires de roues doit être beaucoup moins chargée que les autres, le poids de 24 à 26 tonnes. C'est, pour le poids total, la limite dans laquelle se tiennent communément les constructeurs anglais, mais en exagérant la part afférente aux roues motrices, surtout lorsque ces roues sont placées au milieu.

2° Dimensions des machines.

Les machines locomotives employées sur les chemins de fer à grande circulation peuvent être classées en trois catégories distinctes : les *machines à voyageurs*, les *machines mixtes* et les *machines à marchandises.*

Les machines à voyageurs proprement dites sont caractérisées par l'indépendance des roues motrices et par le diamètre considérable qu'on donne à celles-ci, pour obtenir de grandes vitesses sans fatiguer les organes moteurs par un mouvement d'oscillation trop rapide. Il y a quelques années encore on donnait le plus souvent aux roues motrices un diamètre de $1^m,675$, quelquefois de $1^m,829$; maintenant en Angleterre on peut considérer cette dernière dimension comme un minimum, et le diamètre le plus communément adopté est de $2^m,133$. On a employé exceptionnellement sur la voie étroite les diamètres de $2^m,438$ et de $2^m,590$; sur le Great-Western, c'est la première de ces deux dimensions qui est adoptée pour les machines à voyageurs de la ligne principale.

Les machines mixtes employées spécialement pour

le service des voyageurs sur les lignes à faible pente pour les trains omnibus, ou sur les lignes à forte pente pour les trains de voyageurs de toute nature, ont quatre roues accouplées d'un diamètre moyen de $1^m,675$ et quelquefois de $1^m,829$. Les machines de ce système actuellement adoptées ont une disposition différente de celle qui a été introduite en France par M. Gouin et dont le type est la machine *le Rhône* qui a figuré à l'exposition de 1849; l'écartement des supports extrêmes est considérable et ce sont les roues d'arrière, placées elles-mêmes en arrière de la boîte à feu, qui sont accouplées avec les roues motrices. Les cylindres sont intérieurs et le bâti extérieur aux roues.

Les machines à marchandises proprement dites sont le plus souvent, comme je l'ai déjà indiqué, à six roues accouplées de $1^m,524$ de diamètre, à cylindres intérieurs et à châssis extérieur; les manivelles d'accouplement sont en fer forgé rapportées sur l'extrémité de l'essieu au delà de la boîte à graisse. Cette dernière disposition n'est pas nouvelle, on l'a vue adoptée dans d'anciennes machines à quatre roues accouplées; mais jusqu'à ces derniers temps, elle ne paraît pas avoir été employée pour six roues accouplées présentant un écartement de $4^m,57$, et quelquefois plus entre les essieux extrêmes. Ces machines, en général très-puissantes, armées de cylindres à grande course et de grandes chaudières, ont par suite le centre de gravité très-élevé et la cheminée très-courte.

Le tableau suivant indique les dimensions principales et les éléments de la puissance motrice des diverses machines construites dans ces derniers temps; il donnera une idée des dispositions adoptées le plus souvent par les constructeurs anglais.

Numéros d'ordre.	DÉSIGNATION DES MACHINES. Noms des chemins de fer et des constructeurs.	SURFACE DE CHAUFFE. Foyer.	Tubes.	Totale.	DIAMÈTRE des cylindres.	COURSE des pistons.	DIAMÈTRE des roues motrices.	PRESSION absolue de la vapeur.	ÉCARTEMENT des roues extrêmes.	Observat.
	Machines à voyageurs.	m. q.	m. q.	m. q.	mèt.	mèt.	mèt.	atm.	mèt.	
1	Great-Western. — Ateliers de la Compagnie.	14,12	167,41	181,53	0,457	0,609	2,438	9,16	5,181	(a)
2	London and North-Western. — Crampton.	14,32	198,65	212,97	0,457	0,609	2,438	9,16	5,638	(b)
3	London and North-Western. — Sharp frères.	13,30	102,30	115,60	0,406	0,559	2,133	9,16	5,130	(c)
4	South-Western. — Ateliers de la Compagnie.	7,07	84,53	91,60	0,381	0,533	2,133	9,16	»	(d)
5	Eastern-Counties. — Ateliers de la Compagnie.	»	»	»	0,355	0,559	1,983 / 2,133	7,12	»	(e)
6	Midland. — Constructeurs divers.	7,90	74,40	82,30	0,381	0,508	1,829	7,80	»	(f)
7		8,37	83,70	92,07	0,406	0,508	1,983	7,80	»	
8	London and North-Western. — Ateliers de Crewe.	4,73	67,31	72,04	0,381	0,508	1,829	6,78	»	(g)
9	York-Newcastle et Berwick. — Stephenson.	6,51	101,37	107,88	0,406	0,508	1,983	»	»	(h)
10	Exposition. — Hawthorn.	10,23	80,48	90,71	0,406	0,559	1,983	9,16	4,571	(i)
11	South-Eastern. — Crampton.	»	»	106,95	0,381	0,559	1,829	9.16	4,876	(j)
12	South-Eastern. — Sharp frères.	»	»	106,95	0,381	0,559	1,829	9,16	4,876	(k)
	Machines mixtes.									
13	Great-Northern. — Hawthorn.	9,30	79,44	88,74	0,406	0,559	1,829	9,16	4,571	(l)
14	South-Western. Ateliers de la Compagnie.	7,90	76,45	84,35	0,362	0,533	1,676	9,16	»	(m)
	Machines à marchandises.									
15	Great-Western. — Ateliers de Swindon.	13,60	118,72	131,32	0,432	0,609	1,524	8,48	»	(n)
16	London et North-Western. — Fairbairn.	11,16	132,06	143,22	0,457	0,609	1,524	9,16	»	(o)
17	Great-Northern — Wilson.	11,16	103,95	115,11	0,406	0,711	1,524	»	4,720	(p)
18	North-British - Hawthorn.	6,51	73,00	79,51	0,457	0,609	1,524	7,80	4,265	(q)
19	York et North-Midland. — Divers.	»	»	»	0,381	0,609	1,524	7,32	4,571	(r)
20	Eastern-Counties. — Divers.	»	»	»	0,406	0,609	1,831	7,80	4,20	(s)
21	London and North-Western.—Ateliers de Crewe.	5,44	64,45	69,89	0,381	0,508	1,219	6,78	»	(t)

(a) Machine employée sur la section de Londres à Swindon.
(b) Machine exceptionnelle dont le type n'a pas été adopté.
(c) Type de Sharp adopté par M. Mac-Connell pour les trains-express.
(d) Type du chemin de Rouen, pour trains-express.
(e) Mach. à cylindres extérieurs, type de Stephenson.
(f) Machine à cylindres intérieurs.
(g) Type du chemin de Rouen pour les trains ordinaires-express.
(h) Machine à cylindres intérieurs.
(i) Machine sans destination.—Cylindres intérieurs.
(j) Nouveau type Crampton à cylindres intér. } (*)
(k) Type de Sharp. } (*)
(*) Machines construites sur les mêmes dimensions pour un essai comparatif.
(l) Mach. à 4 roues accouplées.—Cylindres intérieurs.
(m) Idem. Cylindres extérieurs.
(n) Mach. à 6 roues accouplées.—Cylindres intérieurs.
(o) Idem. Idem.
(p) Idem. Idem.
(q) Idem. Idem.
(r) Idem. Idem.
(s) Idem. Idem.
(t) Mach. à 4 roues accouplées.—Cylindres extér.

L'agencement général et les dimensions des organes moteurs d'une machine ne peuvent pas être fixés arbitrairement ; il est nécessaire de tenir compte de la nature du service que doivent effectuer les machines et de la voie sur laquelle elles doivent rouler. Le diamètre des cylindres peut être réduit lorsqu'on augmente la course du piston et vice versâ, pour une machine ayant des roues motrices d'un diamètre déterminé et ayant à remorquer à une vitesse fixée, sur un profil également fixé, un convoi dont on s'est donné la composition à l'avance ; dans ces conditions la relation qui existe entre le diamètre d des cylindres et la course l des pistons résulte de la nécessité de dépenser à chaque coup de piston un poids constant de vapeur (que je suppose pris, bien entendu, à une même pression) ; cette relation peut s'exprimer par la formule $\frac{\pi d^2}{4} l = constante.$ On peut donc faire varier les deux éléments, course et diamètre, pourvu qu'ils continuent de satisfaire à cette relation. Si l'on se donne seulement la vitesse de translation du convoi, sa charge et le profil du chemin, desquels on peut déduire approximativement l'effort de traction T à exercer par la machine, on a une relation simple entre cet effort de traction, le diamètre $D = 2R$ des roues motrices, la course du piston ou le rayon r de la manivelle ($l = 2r$) et le diamètre des pistons. Cette relation peut s'exprimer de la manière suivante, en désignant par p la pression utile moyenne de la vapeur sur 1 centimètre quarré de la surface du piston, d étant exprimé en centimètres :

$$T = p\frac{d^2 r}{R} \quad \text{ou} \quad T = p\frac{d^2 l}{D}.$$

On peut donc pour une pression donnée, et celle-ci doit toujours être aussi élevée que le comportent les di-

mensions de la chaudière et les règlements de police, faire varier d'une infinité de manières les proportions des trois dimensions qui donnent à la machine sa puissance de traction. Mais cela n'est exact que théoriquement; dans la pratique il y a de nombreuses conditions dont il est nécessaire de tenir compte. En première ligne, je placerai la nécessité de ne pas faire tourner les roues motrices, ou osciller le piston et le mécanisme de distribution et d'alimentation avec une vitesse trop considérable; cette vitesse augmente l'effet destructeur de l'inertie et l'instabilité de la machine, si elle n'est pas bien équilibrée; elle augmente les résistances à l'échappement et diminue la pression à l'introduction. La vitesse de rotation des roues ne doit pas excéder, dans les conditions normales du service, trois tours par seconde (1). Il y a donc pour chaque vitesse une limite au-dessous de laquelle il convient de ne pas abaisser le diamètre des roues motrices, et qui sera réglée par la nature du travail que doit effectuer la machine. Le diamètre et la course des pistons ne peuvent pas non plus être fixés arbitrairement dans la pratique; l'une ou l'autre de ces dimensions est souvent dominée par la disposition générale de la machine; la course des pistons est souvent restreinte, parce que la nécessité de faire place aux manivelles coudées conduirait à exagérer la hauteur de la chaudière au-dessus du sol; enfin la nécessité de donner une longueur suffisante aux bielles motrices, combinée avec la distance qui existe entre l'essieu moteur et les cylindres, limite également dans beaucoup de cas la course. Bien qu'il soit souvent fort gênant d'augmenter le diamètre des cylindres, surtout lorsqu'ils sont in-

(1) *Guide du mécanicien*, etc., p. 314.

térieurs, c'est généralement à ce moyen que les constructeurs anglais ont eu recours dans ces derniers temps. En laissant de côté les machines exceptionnelles on voit, dans le tableau de la page 503, la course des pistons limitée à $0^m,56$ pour les machines à voyageurs et $0^m,61$ pour les machines à marchandises; tandis que le diamètre des cylindres qui n'excédait pas, il y a quelques années encore, $0^m,38$, atteint maintenant la limite de $0^m,46$. La considération de l'influence exercée sur les actions perturbatrices dues à l'inertie des pièces du mécanisme n'a pas d'importance appréciable lorsqu'il s'agit de régler les dimensions des cylindres; car si d'une part, à diamètre égal, l'augmentation de course fait croître l'intensité de ces actions proportionnellement au rayon de la manivelle, de l'autre on peut admettre que le poids du piston, de la tige, etc., croît comme le quarré de son diamètre, et le résultat reste toujours le même.

Quant à la détermination des dimensions absolues des cylindres, il ne suffira pas dans la pratique d'introduire dans la relation $T = p \frac{d^2 r}{R}$ la pression effective de la vapeur dans la chaudière, il faudra, pour prendre la machine dans les conditions de travail maximum, c'est-à-dire au premier cran de la détente, retrancher de la pression effective encore 1 ou 1 1/2 atmosphère pour tenir compte des réductions de pression dans les étranglements, de la détente, de la contre-pression et de la compression; il faudra de plus se donner une certaine marge pour les résistances exceptionnelles occasionnées par le vent, par le chauffage des boîtes à graisse, etc.

Le poids dont les roues motrices chargent les rails, au point de contact, doit être en rapport avec l'effort

de traction à exercer; en admettant 1/6 pour le coefficient d'adhérence, on devra le rendre égal à six fois environ l'effort de traction total à exercer. Mais là encore il y a une limite pratique, c'est la charge qu'il est possible d'appliquer sur une seule paire de roues; cette limite, comme je l'ai indiqué plus haut, ne doit guère être portée au delà de 10 tonnes. De là résulte la nécessité d'accoupler avec les roues motrices, suivant la nature du service, une ou deux autres paires de roues.

Il reste enfin dans la combinaison des différentes parties d'une machine locomotive un élément essentiel qui ne peut pas être déterminé arbitrairement, c'est l'étendue de la surface de chauffe dont dépend la puissance de vaporisation. Cette surface de chauffe se compose de deux parties, le foyer dont les parois sont exposées directement, par contact ou par rayonnement à l'action de la chaleur, et les tubes qui sont chauffés par les gaz chauds. On manque complétement de données expérimentales pour déterminer *à priori* la dimension de la surface de chauffe et le rapport de ses deux éléments. J'ai entendu dans plusieurs cas des ingénieurs ou constructeurs anglais poser comme règle le rapport de 1 à 10 entre la surface du foyer et celle des tubes; en prenant les machines comprises dans le tableau de la page 503 et en calculant des moyennes pour chacune des catégories de machines, on trouve les rapports suivants :

Machines à voyageurs.	0,092
Machines mixtes.	0,110
Machines à marchandises.	0,097
Moyenne générale.	0,096

En prenant l'ensemble des principales machines construites en France depuis l'année 1846, et dont les

dimensions sont reproduites dans le *Guide du mécanicien* (tableau de la page 376), on trouve :

Moyenne de 6 machines à voyageurs. . .	0,085
Moyenne de 3 machines mixtes.	0,091
Moyenne de 6 machines à marchandises.	0,077
Moyenne.	0,082

Cette différence entre les machines construites dans les deux pays tient surtout à ce que la plupart des nôtres, à l'imitation de la mode régnante en Angleterre en 1845, ont leurs foyers en porte-à-faux au delà de l'essieu d'arrière, leurs châssis intérieurs et par suite peu de surface de chauffe au foyer, tandis que pendant la même période, en Angleterre, on reportait le troisième essieu en arrière du foyer et le châssis extérieurement aux roues, ce qui permettait d'allonger et d'élargir le foyer et en même temps d'y placer un bouilleur transversal ou longitudinal. Les machines construites en France pèchent en effet assez souvent par l'insuffisance du foyer; en augmentant dans les machines où il est trop petit, sa surface de 2 mètres environ, on retomberait sur un rapport peu différent de celui de 1 à 10, qui paraît répondre le mieux aux convenances de la construction et que j'adopterai plus loin.

Pour ce qui concerne l'étendue totale de la surface de chauffe, on peut faire également des rapprochements intéressants et arriver à une règle empirique utile pour guider les constructeurs, en cherchant le rapport de cette surface à l'élément qui représente la dépense de vapeur à chaque coup de piston; cet élément est le poids de la vapeur dépensée dans les cylindres ou, en supposant une même pression, son volume. En effet, si l'on suppose la vitesse de rotation de l'essieu moteur limitée à un même nombre de tours, trois par seconde,

par exemple, les cylindres puiseront dans la chaudière à chaque révolution une quantité de vapeur proportionnelle à la capacité des cylindres et comme la vaporisation dans de telles circonstances peut être considérée comme proportionnelle à la surface de chauffe (les éléments de celle-ci étant supposés dans un rapport constant) toutes les machines qui auront un même rapport entre la surface de chauffe et le volume de vapeur dépensé dans un cylindre, pour le remplir, devront alimenter l'appareil moteur avec une égale facilité. Il en serait à peu près de même si la vitesse de rotation de l'essieu moteur variait entre des limites peu étendues, mais si le nombre de tours de roues par seconde augmentait notablement, il est évident que la surface de chauffe devrait être calculée suivant un rapport plus grand avec le volume engendré par un piston ; en effet la vaporisation peut être considérée comme produite par deux causes, par le tirage naturel et par le tirage artificiel dû à la marche d'une part et à l'action de l'échappement d'autre part. L'une de ces causes reste constante et en même temps l'autre ne peut pas produire dans un même foyer une quantité de vapeur croissant proportionnellement avec la rapidité de la marche et la fréquence des échappements. La puissance de vaporisation croît suivant une loi moins rapide que le rapport géométrique des nombres d'échappements ou, ce qui est la même chose, des nombres de tours de l'essieu moteur; il faut donc forcer la surface de chauffe lorsqu'on exagère la vitesse de rotation des roues motrices, en donnant à celles-ci un trop petit diamètre pour le service qu'elles ont à effectuer.

Les tableaux qui suivent feront mieux comprendre les considérations qui précèdent; l'un se rapporte aux machines anglaises, dont j'ai déjà indiqué les dimen-

sions principales ; l'autre aux machines françaises qui figurent dans le tableau de la page 375 du *Guide du mécanicien*.

Le rapport que je cherche à mettre en relief, en désignant par S la surface de chauffe totale, par d le diamètre du piston et par l sa course, serait donné par l'expression

$$\frac{S}{\frac{\pi d^2 l}{4}}.$$

En laissant de côté le facteur constant $\frac{\pi}{4}$, et en exprimant S en mètres carrés, d et l en décimètres, la valeur numérique du rapport prend une forme simple, car par suite d'une coïncidence fortuite elle varie en plus ou en moins autour de l'unité.

I. — MACHINES ANGLAISES.

Numéros d'ordre	DÉSIGNATION DES MACHINES.	DIAMÈTRE des roues motrices.	SURFACE de chauffe totale.	CYLINDRES. Diamètre.	CYLINDRES. Course.	RAPPORT $\frac{S}{d^2l}$
	Machines à voyageurs.	m.	m. q.	d. m.	d. m.	
1	Great-Western. — Ateliers de la Compagnie. . .	2,438	181,53	4,57	6,09	1,43
2	London et North-Western. — Crampton.	2,438	212,07	4,57	6,08	1,67
3	*Idem*. Sharp frères. . .	2,183	115,60	4,06	5,59	1,26
4	South-Western.— Ateliers de la Compagnie. . .	2,133	91,60	3,81	5,33	1,18
5	Midland. — Constructeurs divers.	1,829	82,30	3,81	5,08	1,12
6	*Idem*. *Idem*.	1,983	92,07	4,06	5,08	1,10
7	London et North-Western. — Ateliers de Crewe.	1,829	72,04	3,81	5,08	0,98
8	York-Newcastle et Berwick. — Stephenson. . .	1,983	107,88	4,06	5,08	1,29
9	Exposition. — Hawthorn.	1,983	90,71	4,06	5,59	0,98
10	South-Eastern. — Crampton.	1,829	106,95	3.81	5,59	1,32
11	*Idem*. Sharp frères.	1,829	106,95	3,81	5,59	1,32
	Machines mixtes.					
12	Great-Northern. — Hawthorn.	1,829	88,74	4,06	5,59	0,96
13	South-Western. — Ateliers de la Compagnie. . .	1,676	84,35	3,62	5,33	1,21
	Machines à marchandises.					
14	Great-Western. — Ateliers de la Compagnie. . .	1,524	131,32	4,32	6,09	1,15
15	London et North-Western. — Fairbairn.	1,524	143,22	4,57	6,09	1,13
16	Great-Northern. — Wilson.	1,524	115,11	4,06	7,11	0,90
17	North-British. — Hawthorn.	1,524	73,00	4,57	6,09	0,62
18	London et North-Western.	1,219	69,89	3,81	5,08	0,95
	Moyenne générale de 18 machines.					1,15

II. — MACHINES FRANÇAISES.

Numéros d'ordre.	DÉSIGNATION DES MACHINES.		DIAMÈTRE des roues motrices.	SURFACE de chauffe totale.	CYLINDRES. Diamètre.	CYLINDRES. Course.	RAPPORT $\frac{S}{d^2 l}$
	Machines à voyageurs.		m.	m. q.	d. m.	d. m	
1	Paris à Versailles (r. g.). — Sharp et Roberts.	1840	1,66	55,90	3,30	4,60	1,12
2	Paris à Orléans. — Stephenson.	1843	1,70	68,39	3,55	5,10	1,06
3	Orléans à Bordeaux. — Buddicom.	1845	1,67	64,67	3,55	5,35	0,96
4	Nord. — Derosne et Cail.	1846	1,68	71,51	3,80	5,60	0,88
5	Paris à Strasbourg. — Derosne et Cail.	1847	1,68	74,59	3,80	5,60	0,92
6	Paris à Lyon. — Derosne et Cail.	1847	1,80	82,15	3,80	6,00	0,95
7	Tours à Nantes. — Kœchlin.	1837	1,83	72,76	3,80	5,60	0,90
8	Nord. — Crampon. Cail.	1849	2,10	102,34	4,00	5,50	1,16
	Machines mixtes.						
9	Ouest. — Cavé.	1848	1,60	85,80	3,8	5,60	1,06
10	Nord. — Ateliers de la Compagnie.	1849	1,74	74,35	3,8	5,60	0,92
11	Paris à Lyon. — E. Gouin.	1849	1,60	85,40	4,0	5,60	0,95
	Machines à marchandises.						
12	Paris à Orléans. — Stephenson.	1845	1,45	68,80	3,8	6,1	0,78
13	Nord. — Derosne et Cail.	1847	1,22	74,35	3,8	6,1	0,84
14	Tours à Nantes. — Kœchlin.	1847	1,30	76,77	3,8	6,0	0,89
15	Paris à St-Germain — Ateliers de la Comp.	1849	1,21	79,69	4,5	7,0	0,56
16	Paris à Orléans. — C. Polonceau.	1849	1,50	96,65	4,4	6;0	0,83
17	Paris à Strasbourg. — Cail.	1850	1,42	88,72	3,8	6,1	1,01
18	Paris à Lyon. — Cail.	1850	1,50	99,94	4,2	6,0	0,94
						Moyenne générale.	0,93

En examinant ces deux tableaux, on voit que les constructeurs anglais donnent en général plus de surface de chauffe qu'on ne le fait en France. En réalité la différence est encore plus sensible si l'on remarque que dans notre surface de chauffe les tubes entrent pour une plus forte proportion qu'en Angleterre; cela résulte, comme je l'ai indiqué déjà, de ce qu'un grand nombre de nos machines ont le foyer en porte-à-faux et par suite de petite dimension. Enfin si l'on tient compte de ce que le coke est encore notablement supérieur à celui qu'on brûle sur nos chemins de fer, malgré les améliorations considérables que la fabrication de ce dernier a reçu depuis quelques années, la différence sera encore plus saillante.

Je ne chercherai pas à discuter en détail les conclusions que l'on peut déduire de ces tableaux, je me bornerai à formuler celle que j'en ai tirée pour mon propre usage en me reportant, pour éclairer mon appréciation, aux résultats que j'ai pu observer en Angleterre et à ceux qui me sont connus depuis longtemps pour la plupart des machines françaises.

Il m'a semblé qu'en Angleterre on dépassait souvent la limite la plus convenable pour la proportion à établir entre la surface de chauffe et les organes moteurs; cela tient en premier pour certaines machines à ce qu'elles ont été construites dans des conditions exceptionnelles, comme arguments dans la lutte de la voie étroite et de la voie large; pour la plupart des autres, les constructeurs anglais n'ont pas apprécié les avantages que présentait l'emploi intelligent de l'échappement variable, et se sont appliqués à obtenir une vaporisation suffisante pour tous les cas avec des orifices d'échappement fixes et très-larges. En allant au delà de ce qui est nécessaire on a augmenté le poids, le prix d'achat et les frais d'entretien des machines, et, j'en suis convaincu aussi, la dépense de combustible à faire pour un même service. Dans quelques cas l'exagération de la surface de chauffe a pu être motivée par l'insuffisance du diamètre des roues relativement à la vitesse de marche que les machines devaient fournir.

Dans ma pensée, la règle pratique qu'il convient d'adopter pour la construction des machines est la suivante :

1° Vitesse habituelle de rotation de l'essieu moteur : 2 1/2 à 3 tours de roue par seconde;

2° Rapport de la surface de chauffe du foyer à celle des tubes : 1 à 10;

3° Rapport de la surface totale de chauffe au volume engendré par les pistons $\frac{S}{d^2 l} = 1$.

Je pense en effet qu'avec une vitesse d'oscillation modérée des pistons, des chaudières bien disposées pour éviter l'entraînement de l'eau, un échappement bien construit, un foyer moyennement profond et du coke de bonne qualité, on obtiendrait largement toute la quantité de vapeur nécessaire en se plaçant dans des conditions intermédiaires à celles qui ressortent des deux tableaux précédents. Je chercherai à vérifier cette règle par quelques applications numériques, lorsque j'aurai examiné la question de la pression de la vapeur, et ensuite je chercherai quelles conséquences on doit en tirer pour l'agencement général des différentes parties des machines.

3° Pression de la vapeur dans les chaudières.

Les ingénieurs anglais ont augmenté de plus en plus la pression à laquelle la vapeur est engendrée dans les chaudières; ils adoptent maintenant, à peu près uniformément, la pression absolue de $9^{atm},16$, ou effective de 8 kilogrammes par centimètre quarré, dans les machines neuves; dans les machines anciennement construites ou fatiguées par le service, on se contente de 7 à 8 atmosphères de pression absolue. Mais on peut considérer la pression de $9^{atm.},16$ comme une limite un peu nominale et qu'on n'atteint pas généralement en service; elle sert à calculer la charge des soupapes. mais on peut admettre qu'en marche elle n'excède guère habituellement 7 à 8 atmosphères. En augmentant la pression, on a augmenté en même temps le diamètre des chaudières autant que le permettait l'espace compris entre les roues; les dimensions que j'ai rele-

vées dans les machines les plus récentes des chemins à voie étroite varient entre $1^m,07$ et $1^m,32$ pour le diamètre du corps cylindrique, dont la forme est toujours circulaire. On n'a pas fait croître avec la pression et le diamètre des chaudières l'épaisseur du métal qui varie de $9^{mm},5$ à $11^{mm},1$ pour le corps cylindrique, et de 11 à 12 millimètres pour les parois planes de la boîte à feu; on s'est attaché surtout à consolider les parois et en particulier le plafond de la boîte à feu intérieure; les entretoises ont un écartement d'environ $0^m,10$.

En France, l'administration admet sur la formule annexée à l'ordonnance du 22 mai 1843 une tolérance de 1/3 sur l'épaisseur du métal, lorsque toutes les parties planes de la chaudière sont bien consolidées et que les soupapes sont disposées de manière à pouvoir se lever d'au moins 4 millimètres sur leur siége au delà de la pression réglée par les balances en concordance avec le timbre réglementaire. Pour comparer cet état de choses avec ce qui se pratique en Angleterre, j'ai calculé dans le tableau suivant les épaisseurs de métal qui correspondent, d'après cette règle, aux divers diamètres usuels de 1 mètre à $1^m,30$ et aux diverses pressions de 6 à 9 atmosphères absolues.

DIAMÈTRE des chaudières.	ÉPAISSEUR DU MÉTAL.			
	6 atm.	7 atm.	8 atm.	9 atm.
mèt. 1,00	millimètres. 8,00	millimètres. 9,20	millimètres. 10,40	millimètres. 11,60
1,10	8,60	9,92	11,24	12,56
1,20	9,20	10,64	12,80	13,52
1,30	9,80	11,36	13,64	14,48

Dans les cas extrêmes, c'est-à-dire pour des dia-

mètres de 1m,20 à 1m,30 et des pressions de 8 à 9 atmosphères, l'épaisseur réglementaire est environ d'un tiers en sus ou de 3 à 4 millimètres plus forte que celle adoptée par les constructeurs anglais. Cette différence d'épaisseur pour une chaudière de grande dimension, dont les surfaces extérieures ont un développement total d'environ 25 mètres carrés, représente un surcroît de poids d'à peu près 600 kilogrammes. Cette augmentation de poids n'a pas d'importance dans les machines à marchandises dont toutes les roues sont accouplées et peuvent être également et par suite modérément chargées. Il y a un certain inconvénient pour les machines à roues indépendantes que l'on doit s'attacher à rendre aussi légères que possible; mais si l'on remarque qu'en donnant plus d'épaisseur aux parois planes on peut réduire le poids des armatures qui les consolident, et que par suite l'augmentation définitive de poids est peut-être de 500 kilogrammes au plus, cet inconvénient se réduit à peu de chose, car ce n'est qu'une augmentation de 1/2 tonne sur 25 ou 2 p. 100 du poids total; en s'en donnant la peine on la regagnerait facilement sur d'autres parties de la machine. Il peut y avoir également quelques difficultés de plus dans le travail de la chaudronnerie; mais cet inconvénient lui-même n'est pas extrêmement sérieux. Si l'on reconnaissait que les constructeurs anglais sont allés un peu loin et qu'il y a des garanties de sécurité de quelque valeur dans le surcroît d'épaisseur que les règlements obligent à donner en France, on ne devrait pas hésiter à s'en tenir aux épaisseurs actuellement adoptées. Une pression de 9atm.,16 sur un diamètre de 1m,30 pour une épaisseur de 11 millimètres, limites que j'ai trouvées réunies dans un cas particulier, donne à supporter au métal un effort de 5 kilogrammes par

millimètre quarré. Des expériences faites en Angleterre par M. Fairbairn, sur la tôle employée à la construction des chaudières, lui ont donné des résistances variant de 29 à 42 kilogrammes par millimètre quarré. Des expériences de même nature faites plus récemment dans les ateliers de M. E. Gouin ont donné des résistances de 28 à 43 kilogrammes ; quelques-unes de ces dernières expériences ont montré que le métal commençait à prendre un allongement permanent aux deux tiers environ de la charge de rupture. Si l'on admet en outre que les rivures affaiblissent d'un tiers au moins la résistance du métal, que ces rivures sont placées sur le bord des feuilles où la soudure est nécessairement moins parfaite et la résistance moins grande, qu'enfin le métal travaille à une haute température, on arrive à ne pouvoir plus compter que sur une résistance beaucoup moindre que celle qu'indiquent les expériences citées plus haut. En prenant $25^k,5$ pour la résistance minimum de la tôle sur ses bords en déduisant 1/3 pour la rivure, ce qui laisse $16^k,5$, et en admettant que la déformation du métal commence aux 2/3 de cette résistance, ce n'est plus que $10^k,3$ de résistance par millimètre quarré sur lesquels on puisse compter avec sécurité. Les constructeurs et les ingénieurs anglais vont dans le règlement de la pression nominale, qui peut être dépassée quelquefois dans la pratique, à la moitié de cette résistance limite; nos règlements, amendés par la tolérance de 1/3, donnent des efforts en travail normal de $3^k,50$ à $3^k,75$, soit 1/3 environ de la résistance limite. Dans cet état de choses, en considérant que l'épreuve par la presse hydraulique, qui devient d'autant plus indispensable qu'on s'approche plus des limites de résistance, indispensable également pour essayer les arma-

tures, les entretoises, les cornières et tout ce qui soutient ou raccorde les parties planes, double ces efforts, que dans la pratique le dérangement des soupapes, accidentel ou prémédité par les mécaniciens, peut donner lieu à des surcroîts de pression très-notables, qu'enfin le métal diminue d'épaisseur à la longue et se fatigue par les secousses que la machine éprouve, on restera facilement convaincu qu'il y aurait imprudence à suivre les ingénieurs anglais dans la voie où ils sont entrés et où ils ne s'arrêteront sans doute que lorsque des explosions de chaudières parfaitement saines auront eu lieu en service. Il ne faut pas perdre d'ailleurs de vue que la pression n'est élevée aussi haut que pour compenser les imperfections de la coulisse de Stephenson et pour obtenir dans les cylindres, pendant la détente, des pressions assez élevées malgré l'étranglement des orifices d'admission; les dimensions des cylindres, des roues et la charge de celles-ci ne permettraient pas de travailler à pleine vapeur à des pressions de 8 et 9 atmosphères; le mécanisme de distribution et les joints ne supporteraient pas longtemps des pressions aussi considérables. Il vaut donc mieux s'en tenir à des pressions de 6 à 7 atmosphères, comme on le fait en France, et chercher plutôt à améliorer la distribution; j'indiquerai plus loin une disposition que j'ai vu appliquer avec avantage sur une grande échelle, et d'ailleurs le dernier mot des constructeurs n'est pas dit sur cette question de la distribution.

4° Écartement des essieux.

Un des points sur lesquels mon attention s'est plus particulièrement fixé en examinant le matériel des chemins de fer anglais est l'écartement donné aux supports extrêmes de la machine. Dans diverses circon-

stances j'avais eu l'occasion de critiquer la tendance de quelques ingénieurs à mettre une distance considérable entre les points d'appui extrêmes ; je dois dire tout d'abord que j'ai trouvé la pratique des ingénieurs anglais complétement en désaccord avec ma manière de voir, laquelle était plutôt le résultat d'une appréciation instinctive que la conséquence d'un examen approfondi de la question. En jetant les yeux sur le tableau de la page 503, on voit que cet écartement est porté fréquemment à $4^m,876$ et excède quelquefois 5 mètres ; dans un cas particulier, il a été porté par M. Crampton à $5^m,638$. Ce qui m'a le plus étonné, c'est de trouver des écartements de $4^m,57$ et $4^m,72$ pour des machines à marchandises à six roues accouplées, ou mixtes à quatre roues accouplées, à châssis extérieur et à manivelles rapportées sur l'extrémité des essieux au delà de ce châssis, circulant enfin à grande vitesse dans des courbes de 4 à 500 mètres de rayon ; dans ce cas, il est vrai, on donne à chaque boîte à graisse des essieux extrêmes, 1 millimètre 1/2 de jeu dans ses plaques de garde pour faciliter le passage des courbes, mais ce jeu est insignifiant. Partout on m'a déclaré que des écartements aussi considérables n'exerçaient pas une influence nuisible sur la conservation des bandages et la solidité des assemblages du châssis.

L'examen de cette question est très-complexe ; il serait très-difficile d'analyser tous les effets qui se produisent dans le mouvement d'un véhicule sur une voie courbe. En cherchant à le faire d'une manière approximative, je suis arrivé aux résultats qui suivent.

Dans les conditions actuelles de construction des chemins de fer et des machines ou des véhicules, il est facile de reconnaître en premier lieu que le grand écartement des roues extrêmes, porté jusqu'à 5 mètres,

par exemple, les essieux correspondants étant fixés d'une manière invariable sur le châssis, n'est pas un obstacle direct et absolu au mouvement des véhicules dans des courbes de petit rayon; c'est surtout à d'autres causes qu'il faut attribuer la résistance qui se manifeste dans la pratique. S'il s'agit d'un véhicule à quatre roues, les congés de raccordement des boudins avec la surface de roulement des bandages et les bords des rails sont maintenant décrits avec des rayons assez grands pour que la roue ne puisse pas mordre et monter sur le rail; les bandages sont d'ailleurs plus fréquemment rafraîchis, on ne remarque plus des boudins amenés par l'usure au contact des bords d'un rail plat à arêtes vives, à prendre la forme d'une cisaille et offrant des chances sérieuses de déraillement. Pour les véhicules à six roues, les roues du milieu restant toujours, si leur essieu est fixé d'une manière rigide dans le châssis, placées dans le même plan que les roues extrêmes, semblent au premier abord devoir rencontrer le rail intérieur des courbes, lorsque le rayon de celles-ci est très-petit, ainsi qu'on est conduit à le supposer quand on fait un tracé graphique pour s'en rendre compte. Mais lorsqu'on pousse l'examen plus loin et qu'on se met en garde contre les apparences d'un dessin qui ne peut jamais être fait que hors de toute proportion avec la réalité, on reconnaît qu'il n'en est pas ainsi. Le jeu qu'on ménage entre les boudins des roues et les bords des rails, s'il n'est pas inférieur à 7 ou 8 millimètres de chaque côté, est suffisant pour qu'un véhicule à six roues puisse s'inscrire entre les rails; il y a des glissements et des frottements, mais les roues ne peuvent pas se coincer entre les rails dans les circonstances ordinaires; cela ne pourrait avoir lieu que si la voie était pourvue de contre-rails, qui empêche-

raient le jeu des boudins de produire son effet et viendraient presser ceux-ci du côté intérieur à la machine.

J'ai supposé des véhicules portés sur six roues également espacées entre elles et présentant entre les extrêmes des écartements variant de 3 à 5 mètres pour des courbes de 250 à 1.000 mètres de rayon; j'ai calculé dans ces différentes combinaisons la quantité dont le rail intérieur se rapprochait du boudin de la roue du milieu relativement aux roues extrêmes, ou, en d'autres termes, la flèche de l'arc compris entre les points de contact des deux roues extrêmes du même côté. En désignant par *z* la valeur de cette flèche, par *e* l'écartement des essieux extrêmes du véhicule, j'ai formé le tableau suivant :

Rayon des courbes.	Valeurs de *z*.		
	$e = 3^m$	$e = 4^m$	$e = 5^m$
250 mètres. . .	$0^m,0045$	$0^m,008$	$0^m,013$
500	$0^m,0023$	$0^m,004$	$0^m,006$
750	$0^m,0015$	$0^m,003$	$0^m,004$
1,000	$0^m,0013$	$0^m,002$	$0^m,003$

Pour peu que le jeu ménagé dans la construction des machines soit égal à $0^m,010$ de chaque côté, ce qui est un minimum pour les courbes, il restera toujours un espace suffisant pour le passage d'un véhicule à six roues, car ce véhicule mis en mouvement se déplacera, par l'effet de la conicité, en se portant sur le rail extérieur, et dans le cas extrême d'une courbe de 250 mètres de rayon et d'un écartement de 5 mètres, il resterait encore 7 millimètres de jeu entre le boudin de la roue du milieu adjacente au rail intérieur et le bord de ce rail.

C'est donc à tort que certains constructeurs se sont crus obligés de supprimer entièrement les boudins des roues du milieu, même dans des machines n'ayant que

de 3 à 4 mètres d'écartement entre les supports extrêmes, ou de réduire dans une proportion considérable, de moitié par exemple, l'épaisseur de ces boudins de manière à élargir la surface de roulement. C'est seulement à cause des croisements de voie et de leur contre-rails que l'on peut être amené à réduire l'épaisseur des boudins des roues du milieu, mais dans le cas extrême d'un écartement de 5 mètres pour le rayon de 250 mètres adopté habituellement dans les changements de voie, ce serait seulement de quelques millimètres et non pas de 2 centimètres, comme on le fait souvent, qu'il faudrait diminuer cette épaisseur; c'est au contraire du côté opposé, c'est-à-dire sur la joue intérieure du bandage des roues du milieu, qu'il pourrait être nécessaire d'enlever une certaine quantité de métal pour faciliter le jeu des contre-rails.

Ce n'est qu'indirectement que le grand écartement des essieux extrêmes peut exercer une influence nuisible sur la marche et la conservation des véhicules; mais comme alors les conditions de stabilité se trouvent améliorées, il y a tout lieu de croire que dans de certaines limites la somme des avantages excède celle des inconvénients.

Le parallélisme des essieux extrêmes, je laisse de côté le cas où les roues d'arrière, comme dans les machines à voyageurs du chemin de Rouen, sont à peu près indépendantes du châssis, a pour effet d'augmenter l'insuffisance de la conicité généralement adoptée, et de maintenir les roues dans une position oblique à la tangente de la courbe au point de contact, et par suite de déterminer des glissements et des frottements qui absorbent une partie du travail moteur et hâtent l'usure des bandages. En augmentant l'écartement des essieux extrêmes, on augmente l'influence nuisible du parallé-

lisme. On sait en effet qu'un wagon monté sur des roues de diamètre inégal tend à décrire une courbe d'un rayon plus grand que celui de la courbe que décrirait séparément chacun de ces essieux ; cet effet est la conséquence du parallélisme et s'aggrave avec l'écart des essieux assujettis au parallélisme.

La conicité des roues et le jeu conservé entre leurs boudins et le bord des rails sert à racheter la différence de longueur des chemins à parcourir sur chaque cours de rails ; en prenant isolément un essieu, et en le supposant mis en mouvement pour son propre compte sur une courbe, il est facile de calculer le jeu qu'il serait nécessaire de laisser entre le boudin des roues et le bord des rails, la conicité des roues étant donnée, pour que la courbe soit parcourue sans qu'il y ait glissement des roues ; en faisant ce calcul, on reconnaît, comme l'a d'ailleurs fait voir déjà M. Combes (1), que pour un même rayon de courbure, le jeu de la voie doit augmenter avec le diamètre des roues. En désignant par r le rayon des roues, par x l'intervalle à laisser entre le boudin de chaque roue et le bord du rail, ou la moitié du jeu total de la machine, pour que les roues puissent prendre spontanément des rayons de roulement proportionnels aux deux cours de rails, sans que les boudins viennent s'appuyer sur le rail extérieur, on forme le tableau suivant :

Rayon des courbes.	Valeurs de x.			
	$r = 0^m,50$	$r = 0^m,75$	$r = 1^m,00$	$r = 1^m,25$
250 mètres.	$0^m,030$	$0^m,045$	$0^m,060$	$0^m,075$
500	$0^m,014$	$0^m,022$	$0^m,030$	$0^m,037$
750	$0^m,010$	$0^m,015$	$0^m,020$	$0^m,025$
1.000	$0^m,007$	$0^m,011$	$0^m,015$	$0^m,019$

(1) *Annales des mines*, t. II, 4e série, p. 726 et suivantes.

Il résulte des chiffres contenus dans ce tableau que pour les roues de la plupart des véhicules, actuellement employées, la conicité serait suffisante, sur des chemins tracés avec des courbes de 750 à 1.000 mètres de rayon, pour des essieux mis en mouvement isolément, et que les rebords des roues n'atteindraient pas le rail extérieur, si le jeu ménagé de chaque côté était porté seulement à $0^m.015$; il y a tout lieu de croire que malgré le parallélisme forcé des essieux, le jeu que l'on peut porter dans les courbes à $0^m,20$ et même $0^m,25$ serait encore suffisant pour empêcher le contact des boudins. Les roues d'un diamètre supérieur à $1^m,50$ ne sont employées que pour des machines mixtes ou pour des machines à voyageurs; leur nombre est toujours très-petit relativement à la composition des convois, et si par suite du parallélisme des essieux les rebords venaient à frotter, ce ne serait que sous l'influence d'une pression peu considérable, en rapport avec le peu qui leur manque pour que la conicité convenable soit obtenue ; de telle sorte que ce serait en somme une augmentation négligeable de résistance et d'usure dans l'ensemble du travail effectué. Il est même possible, et c'est ce qu'on paraît entrevoir lorsqu'on essaye d'entrer plus avant dans l'examen de ce qui se passe en réalité sous l'influence combinée de la conicité, du jeu de la voie, du parallélisme et de l'écartement des essieux, que des roues d'un grand diamètre placées à l'arrière, comme dans les machines Crampton, aient en réalité un jeu suffisant, leur déplacement transversal restant au-dessous de ce qu'indique la théorie pour des essieux indépendants. Jusqu'à plus ample examen, on ne voit donc pas qu'il y ait lieu de modifier sous ce rapport les usages reçus pour la conicité et le jeu des boudins, pour des écartements des roues extrêmes allant à 4 et 5 mètres.

C'est seulement dans les changements de voie où le rayon des courbes descend à 250 mètres, que l'insuffisance du jeu et de la conicité peut gêner d'une manière très-marquée le mouvement des véhicules et spécialement celui des machines, mais c'est là un inconvénient inévitable; il y a dans ce cas des glissements et des frottements considérables, qui amènent la prompte destruction des rails, et qui sont certainement un élément important parmi les causes d'usure des bandages.

Si l'on voulait tracer un chemin de fer avec des courbes nombreuses de 500 mètres de rayon et au-dessous, il y aurait au contraire à examiner s'il ne conviendrait pas d'augmenter la conicité des roues, de la porter par exemple à 1/10; avec un fort bombement comme celui qu'on adopte maintenant en Angleterre, il n'y aurait pas d'inconvénient appréciable à faire rouler les wagons avec conicité de 1/10 sur des rails inclinés à 1/20 et *vice versâ*; on pourrait donc recourir à cet expédient pour tracer les embranchements à petit trafic d'une grande ligne, sans renoncer aux avantages de la circulation réciproque des wagons.

Jusqu'ici la pratique, indépendamment des aperçus qui précèdent, ne paraît pas condamner les grands écartements, soit au point de vue de la résistance au mouvement, soit au point de vue de l'usure des bandages; on doit donc admettre, comme je l'ai déjà indiqué, que l'influence nuisible qui peut en être la conséquence est masquée par l'amélioration qui résulte au contraire de l'augmentation de stabilité. En effet, des wagons sollicités à se jeter tantôt à droite, tantôt à gauche, par les inégalités de pose de la voie, par le défaut du montage des essieux et par toutes les causes qui produisent le mouvement de lacet, des machines soumises aux mêmes actions et de plus à l'action pertur-

batrice de leur mécanisme, ne peuvent pas être considérés comme roulant toujours, même en ligne droite, sur les circonférences de contact qui correspondent aux chemins parcours sur les deux lignes de rails. Ce n'est qu'en moyenne que les roues suivent la ligne formée par l'arête supérieure du champignon des rails, et celle-ci peut être considérée comme un axe de part et d'autre duquel ont lieu des oscillations indéfiniment répétées; de telle sorte qu'un long parcours en ligne droite peut donner lieu à plus de glissements et d'usure que des parcours toujours moins considérables sur des courbes de petit rayon. Par le même motif tout ce qui augmente la stabilité, comme l'augmentation d'écartement des supports extrêmes, même en sacrifiant les conditions de bonne marche dans les courbes, peut, dans une certaine mesure, profiter à l'économie de la force motrice et à la conservation du matériel.

En cherchant à faire quelques calculs approximatifs, j'ai reconnu que la résistance due aux glissements, lorsqu'il n'y avait pas de pression exercée par les rebords des roues sur le bord des rails, n'était qu'une fraction insignifiante de la résistance totale du convoi, c'est-à-dire à peine quelques centièmes pour des courbes de 250 mètres de rayon; cela tient à ce que les glissements ne sont qu'une très-petite fraction du développement des roues dans leur mouvement de rotation; ces glissements ne se produisent que dans les courbes, c'est-à-dire sur une fraction seulement du parcours. La résistance due à une petite insuffisance de conicité ou de jeu, quoiqu'elle soit produite par des frottements qui s'exercent sur toute la circonférence des roues, est elle-même peu de chose, soit parce qu'elle n'a lieu que pour un très-petit nombre de roues, une ou deux au plus sur l'ensemble d'un convoi, soit parce qu'une pression très-

faible suffit pour empêcher les roues de prendre la position que tend à leur donner la conicité.

Rien de tout cela n'est comparable à l'effet que peut produire la force centrifuge, si le rail extérieur n'est pas suffisamment relevé dans les courbes. C'est dans ce cas qu'il se produit des frottements capables de faire équilibre à une portion considérable de la force motrice, et d'amener la prompte destruction des boudins. En calculant l'intensité de la force centrifuge qui solliciterait, sur une voie en courbe de 250 mètres de rayon dont les rails seraient au même niveau, un convoi de 30 wagons de marchandises chargés, pesant 8 tonnes et marchant à la vitesse de 36 kilomètres à l'heure, le coefficient de frottement dû à cette force centrifuge étant supposé comme l'adhérence égal à 1/6, on trouve une résistance totale de près de 1.900 kilogrammes, sensiblement égale à la somme des résistances ordinaires qui solliciteraient le convoi dans sa marche normale en ligne droite. Dans une courbe de 1.000 mètres de rayon, à une vitesse double de 72 kilomètres à l'heure, le même train serait soumis par l'effet de la force centrifuge à la même résistance additionnelle. Pour éviter cet effet, le rail extérieur doit être relevé d'une quantité x telle que le plan de la voie soit perpendiculaire à la résultante du poids et de la force centrifuge. Par suite, si l'on désigne par l la largeur de la voie, par V la vitesse exprimée en mètres par seconde, par R le rayon de la courbe, on a $x = l\frac{V^2}{gR}$; dans les deux cas indiqués plus haut $x = 0^m,061$.

Quelques ingénieurs se contentent de prendre une moyenne entre les hauteurs convenant aux vitesses des différentes sortes de trains ; c'est à tort qu'ils le font, car la conicité et le jeu de la voie suffisent le plus

souvent pour empêcher les boudins de s'appuyer et de frotter sur le rail intérieur, lorsque le relèvement du rail extérieur est trop grand, et de plus le contact des boudins sur le rail intérieur à la courbe ne peut présenter aucun danger, tandis que ce contact sur le rail extérieur, sous une pression assez forte, peut occasionner un déraillement. Sur le chemin de fer du Nord, M. Maniel a été conduit par une étude approfondie de la question à donner à toutes les courbes parcourues en vitesse le relèvement qui correspond à la vitesse de 80 kilomètres à l'heure, qui est la vitesse habituelle de marche des trains express. Sur les chemins de fer anglais, la pratique du relèvement du rail extérieur ne paraît pas, en général, être adoptée aussi largement que le demanderaient la vitesse et la multiplicité des trains express.

Dans les changements de voie où le relèvement du rail extérieur ne peut pas être pratiqué, il est nécessaire de ne faire marcher que très-lentement les machines, précaution qui n'est presque jamais observée d'une manière suffisante par les mécaniciens.

5° Disposition générale des machines.

J'ai indiqué précédemment la préférence donnée par la plupart des constructeurs anglais aux machines à cylindres intérieurs. L'une des raisons principales qui les ont conduits à renoncer aux cylindres extérieurs est l'instabilité de celle-ci ; en faisant un emploi judicieux des contre-poids dont ils reconnaîtront forcément l'utilité, malgré l'indifférence générale avec laquelle ont été accueillies les indications que j'ai fournies à plusieurs d'entre eux, ils arriveront sans doute à ne plus attacher à cette considération qu'une importance secondaire. Les motifs qui continueront à militer en fa-

veur du système des machines à cylindres intérieurs seront surtout la solidité avec laquelle les cylindres s'attachent au châssis et la facilité d'agencement des bielles dans les machines à roues accouplées.

Pour les machines à voyageurs à roues indépendantes, les conditions ne sont plus les mêmes; l'emploi d'un double châssis intérieur pour les roues motrices et extérieur pour les roues de support lève la difficulté relative à l'attache des cylindres; il permet de fixer solidement les glissières, d'élargir les chaudières et les foyers, aussi bien que dans les machines à cylindres intérieurs et à bâti extérieur. En outre, ce système est commandé par la nécessité de donner aujourd'hui un grand diamètre aux roues motrices; car, pour des machines à roues indépendantes, on ne doit plus faire de roues ayant moins de 2 mètres de diamètre; on arrive déjà à $2^m,30$; plus tard, on ira jusqu'à $2^m,50$ et peut-être au delà, ces machines devant être affectées exclusivement à des trains express et le service ordinaire des trains omnibus réclamant de plus en plus l'emploi des machines mixtes avec roues de $1^m,60$ à $1^m,80$ de diamètre. Avec un diamètre minimum de 2 mètres aux roues motrices, avec les courses de cylindres qui deviennent par suite nécessaires, on ne peut plus placer un essieu coudé sous la chaudière sans relever celle-ci à une hauteur considérable et sans raccourcir outre mesure la cheminée, dont la hauteur au-dessus des rails se trouve limitée généralement à $4^m,30$. L'inconvénient de cette disposition serait surtout de relever considérablement le centre de gravité du système.

J'ai eu l'occasion d'établir dans diverses circonstances que la question de la hauteur du centre de gravité des machines n'avait pas l'importance que lui donnaient beaucoup d'ingénieurs qui y voyaient un élément

essentiel de stabilité pendant la marche ; c'est seulement en cas d'accident que cette question a une importance réelle. L'expérience des machines du système Crampton employées sur le chemin de fer du Nord a démontré que ces machines, autant par le peu d'élévation du centre de gravité que par le grand écartement des supports extrêmes et la bonne répartition de la charge, se comportaient d'une manière remarquable dans les accidents auxquels est soumis inévitablement le service des chemins de fer, tels que déraillements, collisions, etc. Dans beaucoup de circonstances où d'autres machines auraient été renversées sur le flanc, celles-ci sont restées debout sur les rails, sur la voie ou même sur les talus des remblais, et ont pu fournir la course nécessaire à l'amortissement de la force vive dont le convoi était animé. C'est là dans ma pensée un motif qui doit conduire les constructeurs à s'ingénier pour abaisser le centre de gravité ; c'est ce motif qui doit surtout faire proscrire l'usage des cylindres intérieurs et des essieux coudés dans les machines à grande vitesse. On doit remarquer d'ailleurs qu'un essieu coudé ne peut être placé qu'en avant du foyer, à une assez grande distance de sa paroi pour laisser libre le passage des manivelles et têtes de bielles, de telle sorte qu'on ne peut donner au centre de gravité une position convenable qu'en allongeant démesurément la chaudière et la distance des points d'appui extrêmes. Les machines du type n° 11 (tableau de la page 503) que MM. Sharp frères ont voulu mettre en concurrence avec des machines du système mixte de M. Crampton, dont je parlerai tout à l'heure, ont donné des résultats très-défavorables comme stabilité, parce que le centre de gravité est sur l'essieu moteur, s'il n'est même en arrière. Celles du type n° 3 des mêmes constructeurs se-

ront dans des conditions moins défavorables, parce que la chaudière a été allongée et l'essieu moteur reculé d'environ 0^{m},25 ; mais elles laisseront encore à désirer beaucoup et auront le grand inconvénient d'avoir le centre de gravité trop élevé et de faire avec une grande facilité la culbute, lorsqu'elles sortiront de la voie ou rencontreront un obstacle.

C'est pour ce motif que le nouveau type de machines créé par M. Crampton, et dont il a fait la première application sur le chemin de fer du South-Eastern, ne peut être appliqué que dans des limites assez restreintes. Ces machines, avec des roues de 1^{m},827 de diamètre, ont la chaudière trop élevée; on a dû forcément renoncer à cette disposition pour les machines de grande vitesse récemment commandées par la compagnie du chemin de fer de Paris à Strasbourg avec roues motrices de 2^{m},30. Ce nouveau type de machines mérite cependant de fixer l'attention ; les cylindres placés sous la chaudière commandent un axe coudé qui ne porte pas de roues èt qui reçoit au contraire des manivelles extérieures au moyen desquelles sont commandées les roues motrices placées en arrière du foyer; cet axe intermédiaire porte les excentriques de la distribution. Les quatre roues portantes sont réunies à l'avant, comme dans les machines américaines, mais fixées au châssis qu'elles supportent par l'intermédiaire de deux ressorts seulement ; l'essieu d'arrière n'a qu'un seul ressort placé en travers, de telle sorte que le châssis et tout ce qu'il porte ne repose que par trois points sur les supports. Par cet ensemble de dispositions on réalise plusieurs avantages : on peut attacher très-solidement les cylindres en les plaçant à l'intérieur sans soumettre l'axe coudé aux chances de rupture résultant du glissement des roues et de la réaction d'une

voie mal posée ; la charge des roues est fixée une fois pour toutes et ne peut pas varier ; les pièces du mécanisme se font en partie équilibre par leur opposition.

Cette disposition de machine, basée sur l'emploi d'un axe coudé intermédiaire, a été réalisée d'une manière différente par d'autres constructeurs anglais, qui en ont profité pour construire des machines à quatre roues accouplées et à cylindres intérieurs ; dans ce cas, la machine n'a que quatre roues placées aux extrémités du châssis, l'axe intermédiaire est entre les roues et par ses manivelles extérieures les commande simultanément au moyen de deux bielles qui font en même temps l'office de bielles motrices et de bielles d'accouplement. Cette disposition paraît être la plus favorable de toutes celles qui peuvent être adoptées pour des machines mixtes dont les roues doivent avoir 1m,60 à 1m,80 de diamètre.

Le système des cylindres extérieurs doit donc, dans ma pensée, être seul désormais employé pour les machines à roues indépendantes et en même temps à grand diamètre. Si ces roues n'ont que 2 mètres ou à peu près de diamètre, rien ne s'oppose absolument à ce que l'essieu moteur soit encore placé sous le corps cylindrique de la chaudière en avant du foyer, la deuxième paire de roues de support étant reportée en arrière, surtout si le mécanisme de distribution est ramené à l'extérieur comme dans les machines du système Crampton ou par l'emploi de toute autre disposition équivalente ; dans ce cas, avec une chaudière de 1m,30 de diamètre, en tenant compte du diamètre de l'essieu moteur, de l'épaisseur des enveloppes, etc., la cheminée aurait encore 1m,70 à 1m,80 de hauteur (1) ; un

(1) Quoique la hauteur des cheminées paraisse exercer une influence favorable sur le tirage et sur le jeu de l'échappement,

emploi judicieux des contre-poids donnerait à la machine toute la stabilité désirable, celle-ci étant accrue d'ailleurs par la position en arrière du foyer de la deuxième paire de roues portantes, à laquelle il ne paraît pas nécessaire de donner du jeu, comme on l'a fait souvent et comme je l'avais recommandé moi-même jusqu'ici, tant que l'écartement des supports extrêmes reste compris entre les limites de 4 à 5 mètres sur des chemins à courbes de rayons compris entre 750 et 1.000 mètres. La considération principale à faire valoir contre cette disposition serait l'exhaussement du centre de gravité des machines, qui serait encore assez grand. Mais, à part cette considération, on ferait encore sur ce type de bonnes machines; il n'y aurait aucun inconvénient très-sérieux à l'adopter, surtout pour modifier d'anciennes machines à roues trop petites, bien qu'en principe il soit préférable de placer l'essieu moteur à l'arrière.

Lorsqu'on arrive à des diamètres de roues motrices de 2m,30 à 2m,50, il faut nécessairement reporter l'essieu moteur à l'arrière, car il s'agit de construire des machines destinées à remorquer des convois animés d'une très-grande vitesse, et tout ce qui peut atténuer en pareil cas la gravité des accidents doit être pris en très-grande considération; on ne peut plus reculer devant la nécessité d'abaisser le centre de gravité du système. On sera conduit dans beaucoup de cas à incliner les cylindres pour obtenir une répartition convenable des points d'appui; mais avec le grand écartement des

---

c'est surtout pour faire apprécier la hauteur des masses principales au-dessus des rails que je calcule leur dimension; c'est en effet par l'exiguïté de la cheminée qu'on se rend compte de suite de l'exhaussement considérable donné à la chaudière dans beaucoup de machines.

essieux extrêmes qu'on est conduit à donner à ces machines et avec la faible inclinaison qu'il sera possible d'adopter, cette disposition n'aura pas d'inconvénient appréciable.

Ainsi que j'ai déjà eu l'occasion de l'indiquer pour les machines mixtes destinées au service des voyageurs dont les roues doivent avoir un diamètre moyen de 1m,60 à 1m,80, la disposition la plus convenable paraît être celle des machines à quatre roues commandées par un axe intermédiaire coudé qui reçoit le mouvement de cylindres placés à l'intérieur, et le renvoie aux roues motrices par une manivelle extérieure. L'agencement de ces machines ne présente pas de difficulté; il suffirait, par exemple, sans modification notable des autres parties, de supprimer dans la machine *le Rhône* (Pl. LXIV et LXV du *Guide du mécanicien*) les roues d'arrière et de les remplacer par les roues du milieu, dont l'essieu resterait seul pour commander les quatre roues motrices au moyen de manivelles extérieures; pour éviter une surcharge des rails, il suffirait de réduire de 2 à 3 tonnes le poids total de la machine. L'emploi de l'essieu coudé donnerait au centre de gravité de ces machines une hauteur assez grande; mais c'est un inconvénient qu'on ne pourrait éviter qu'en ayant recours à des dispositions tout à fait nouvelles que l'expérience n'a pas fait connaître encore, si l'on tient, comme il y a lieu de le faire, à éviter les difficultés d'accouplement des roues et de porte-à-faux des machines à cylindres extérieurs. Dans le cas où l'on serait conduit par des considérations particulières à faire des machines mixtes à cylindres extérieurs, l'emploi de six roues devient une condition indispensable. Les roues motrices doivent être placées en avant du foyer et la seconde paire de roues accouplées en ar-

rière ; en outre, pour éviter un porte-à-faux trop considérable des cylindres en dehors du bâti, la bielle motrice doit venir s'appliquer sur l'extrémité de la bielle d'accouplement comme dans les machines mixtes du chemin de fer du Nord.

Pour les machines à marchandises légères, la disposition la plus convenable est encore celle que j'ai indiquée pour les machines mixtes ; elle n'aurait pas l'inconvénient de relever trop haut le centre de gravité des machines, les roues n'ayant plus qu'un diamètre de 1^{m},40 à 1^{m},50. L'inconvénient de la hauteur du centre de gravité diminue d'ailleurs avec la vitesse du service auquel les machines sont affectées. Il n'est nécessaire de recourir à l'accouplement des six roues que pour remorquer des charges considérables ou desservir des chemins à rampes prononcées ; on doit alors disposer de toutes les ressources que donne l'accouplement des six roues et porter le poids à 30 tonnes environ, en le répartissant à peu près également sur les trois essieux.

Pour augmenter la dimension de la surface de chauffe, on ne doit pas reculer dans ce dernier cas et moins encore dans celui des machines à quatre roues commandées par un axe intermédiaire, à placer les longerons du bâti extérieurement pour augmenter la largeur de la boîte à feu et y placer au besoin un bouilleur longitudinal qui augmente la surface de chauffe directe.

Les règles pratiques que j'ai posées successivement dans les paragraphes qui précèdent pourront être modifiées et surtout mieux appropriées aux diverses catégories de circonstances dans lesquelles les machines peuvent être employées ; mais dans l'état actuel de la question, je pense qu'elles peuvent utilement servir

de point de départ aux constructeurs, sauf à eux à s'en écarter plus ou moins dans chaque cas particulier, en raison des conditions de service et des nécessités de construction où ils se trouveront placés. Le point sur lequel il pourra y avoir le plus de divergence sera l'appréciation des résistances à vaincre; jusqu'à ce que la question ait été plus complétement traitée, je pense qu'on peut se servir de la formule de Wyndham Harding pour apprécier la résistance du train remorqué et de la machine et de son tender considérés comme véhicules, en ayant soin, pour avoir égard à la résistance additionnelle due aux frottements du mécanisme, sous la pression de la vapeur, d'augmenter de 1/4 à 1/5, suivant qu'il s'agit de convois de voyageurs ou de marchandises, le résultat obtenu par cette formule. (*Voir* le *Guide du mécanicien*, pages 547 à 549). Quelques exemples serviront à préciser ces règles pratiques.

1er EXEMPLE. *Train express de huit wagons, pesant chacun 7 tonnes 1/2, marchant habituellement à la vitesse de 80 kilomètres à l'heure, sur des rampes de 0m,005 par mètre. — Poids de la machine, 25 tonnes; du tender chargé, 12 tonnes.*

Le poids total du convoi est de.	97 tonnes.
La résistance totale due au mouvement des véhicules est égale (1), à raison de 11kg,84 par tonne, à. . .	kilogr. 1.148,48
A reporter.	1.148,48

(1) La formule de Wyndham Harding, en désignant par V la vitesse en kilomètres à l'heure, par N la surface de front des véhicules en mètres carrés, par P le poids du convoi en tonnes, par T la résistance cherchée en kilogrammes

$$T = 2,72 + 0,094V + 0,00484\,\frac{NV^2}{P},$$

ou en supposant N = 5, ce qui est à peu près exact dans tous les cas :

$$T = 2,72 + 0,094V + 0,0242\,\frac{V^2}{P}.$$

Report.	1.148,48
La résistance additionnelle à raison de 25 p. 100. . .	287,16
La résistance due à la gravité à 5 kilogr. par tonne.	485,00
Résistance totale à vaincre par le travail de la vapeur. . . . . T =	1.920,64

En supposant le nombre des tours de roues par seconde égal à 2 1/2, on aurait pour le diamètre D des roues motrices, la vitesse étant de $22^m,22$ par seconde,

$D = \frac{2.22}{\pi \times 2.5} = 2^m,83$; pour trois tours, on aurait $D = 2^m,36$; en prenant $D = 2^m,50$, on se placera dans de bonnes conditions.

La pression dans la chaudière étant supposée égale à 7 atmosphères, on peut admettre dans les cylindres une pression moyenne utile de $4^{atm.},5$ pour l'admission au premier cran de la détente, en déduisant 1 atmosphère pour la pression atmosphérique et $1^{atm.}$ 1/2 pour la contre-pression, la détente, la compression et le passage de la vapeur de la chaudière aux cylindres, soit une pression $p = 4^k,64$ par centimètre quarré.

En désignant par d le diamètre des cylindres et par l la course des pistons, on a, d'après la relation de la page 504, $T = p\frac{d^2l}{D}$, dans laquelle d est exprimé en centimètres, et dans laquelle j'exprimerai également l et D en centimètres. On en déduit $d^2l = D\frac{T}{p}$ 103482. En supposant $d = 0^m,420$, on trouve $l = 0^m,586$.

Pour avoir une adhérence suffisante, en admettant le coefficient de 1/6, il faudrait donner aux roues motrices, y compris leur propre poids, une charge totale de $11^t,5$, ce qui donnerait 1.917 kilogrammes d'adhérence pour une traction totale de 1.920 kilogrammes; l'excédant de cette charge sur la charge normale

de 10 tonnes que j'ai admise n'est pas suffisante pour qu'il y ait lieu de compliquer la construction par l'accouplement d'une seconde paire de roues.

La surface de chauffe doit être déterminée par la relation $\frac{S}{d'l} = 1$, dans laquelle d et l sont exprimés en décimètres et S en mètres quarrés; la surface de chauffe S' du foyer et celle S'' des tubes doivent être dans le rapport

$$\frac{S'}{S''} = \frac{1}{10};$$

comme $d'l = 103{,}48$

on a

$$S = 103^{mq},48$$
$$S' = 9{,}41$$
$$S'' = 94{,}07$$

En récapitulant les résultats qui précèdent, on a pour la détermination des éléments qui constituent la puissance de la machine :

	Valeurs calculées.	Nombres ronds.
Diamètre des roues motrices. .	$2^m,36$ à $2^m,83$	$2^m,50$
Charge.	$11^t,5$	$11^t,50$
Diamètre des cylindres.	$0^m,420$	$0^m,42$
Course des pistons.	$0^m,586$	$0^m,58$
Surface de chauffe du foyer. . .	$9^{mq},410$	$9^{mq},50$
Surface de chauffe des tubes. .	$94^{mq},070$	$95^{mq},00$

On obtiendrait facilement ces dimensions en ajoutant un bouilleur dans le foyer des machines Crampton du chemin de fer du Nord et en agrandissant, en proportion avec le diamètre des roues, le diamètre et la course des pistons. On peut admettre que ces machines, qui fournissent souvent des vitesses de 80 kilomètres à l'heure et au delà, ont encore des roues un peu trop petites pour leur service habituel; les nouveaux éléments calculés plus haut répondraient mieux à leur travail normal.

2e EXEMPLE. *Train omnibus, marchant avec seize wagons de 7 tonnes 1/2, à une vitesse qui n'excède pas 45 kilomètres à la montée des rampes de 5 millimètres et 55 kilomètres à l'heure sur niveau ou à la descente. — Poids de la machine, 24 tonnes, et du tender, 11 tonnes.*

En appliquant à cet exemple les mêmes calculs qu'au précédent, on trouve les résultats suivants :

Poids total du convoi		155t,00
Résistance due au mouvement des véhicules, à 45 kilomètres à l'heure, 8kg,27 par tonne, soit		kilogr. 1.281,85
Résistance additionnelle, 1/4		320,46
Résistance due à la gravité		775,00
Résistance totale		2.377,31
Diamètre des roues motrices, calculé pour la vitesse de 55 kilomètres à l'heure :		
A 2 tours 1/2 par seconde	1m,94	
A 3 tours par seconde	1m,62	
Moyenne	1m78	1m,78
Charge sur les roues motrices pour une adhérence de 1/6		14t,86
Deux paires de roues accouplées donnent en moyenne une charge par essieu de		7t,1/2
Pression moyenne utile par centimètre carré de la surface des pistons		4k,64
Valeur de d^2l		91198c.c.
Diamètre des cylindres		0m,40
Course des pistons		0m,57
Surface de chauffe totale		91mq,20
Surface de chauffe du foyer		8mq,29
Surface de chauffe des tubes		82mq,91

Les résultats ainsi obtenus, de données prises au hasard, concordent d'une manière remarquable avec les éléments des machines mixtes du chemin de fer de Lyon qui ont été construites par M. E. Gouin et qui sont, comme on le sait, dans d'excellentes conditions de service; ces machines ont les unes des roues de 1m,60, les autres de 1m,80 ; le tableau suivant en donne la comparaison :

	Machines E. Gouin.	Valeurs calculées.
Nombre des roues accouplées. . . .	4	4
Diamètre des roues motrices.	$1^m,60$ à $1^m,80$	$1^m,78$
Charge des roues motrices.	16 tonnes	$15^t,00$
Diamètre des cylindres.	$0^m,40$	$0^m,40$
Course des pistons.	$0^m,56$	$0^m,57$
Surface de chauffe du foyer.	$7^{mq},86$	$8^{mq},29$
Surface de chauffe des tubes.	$77^{mq},60$	$82^{mq},91$
Surface de chauffe totale.	$85^{mq},46$	$91^{mq},20$

3ᵉ EXEMPLE. ***Train de marchandises marchant avec quarante wagons pesant* 9 *tonnes chacun*, *à une vitesse de* 30 *kilomètres à l'heure à la montée des rampes de* 5 *millimètres et à la vitesse de* 40 *kilomètres à l'heure à la descente. — Poids de la machine*, 28 *tonnes*, *et du tender*, 12 *tonnes.***

En effectuant les mêmes calculs que ci-dessus, on trouve :

Poids total du convoi.	$400^t,00$
Résistance due au mouvement des véhicules, à $5^k,60$ par tonne, soit.	kilogr. 2.240,00
Résistance additionnelle calculée pour 1/5.	448,00
Résistance due à la gravité.	2.000,00
Total.	4.688,00

Diamètre des roues motrices pour la vitesse de 40 kilomètres à l'heure :

A 2 tours 1/2 par seconde. . . .	$1^m,41$	
A 3 tours par seconde.	$1^m,18$	
Moyenne.	$1^m,295$	$1^m,30$

Charge pour l'adhérence à 1/6.	$28^t,13$
Trois paires de roues accouplées portant par essieu.	$9^t,1/2$
Pression moyenne utile.	$4^k,64$
Valeur de d^2l.	$1.313.39^k$
Diamètre des cylindres.	$0^m,46$
Course des pistons.	$0^m,62$
Surface de chauffe totale.	$131^{mq},34$
Surface de chauffe du foyer.	$11^{mq},94$
Surface de chauffe des tubes.	$119^{mq},40$

Les machines qui se rapprochent le plus de celle

dont les éléments viennent d'être calculés sont les nouvelles machines à marchandises du chemin de fer du Nord, destinées à remorquer trente wagons de houille pesant chacun, avec leur chargement, 13 tonnes, et pesant elles-mêmes 33 tonnes; en admettant que le tender pèse 12 tonnes, on peut former le tableau comparatif suivant :

	Nord	Valeurs calculées.
Poids brut du convoi.	$435^t,00$	$400^t,00$
Diamètre des roues motrices. . .	$1^m,44$	$1^m,30$
Charge pour l'adhérence.	$33^t,00$	$28^t,50$
Diamètre des cylindres.	$0^m,46$	$0^m,46$
Course des pistons.	$0^m,68$	$0^m,62$
Surface de chauffe du foyer. . . .	$9^{mq},10$	$11^{mq},94$
Surface de chauffe des tubes. . .	$116^{mq},70$	$119^{mq},40$
Surface de chauffe totale.	$125^{mq},80$	$131^{mq},34$

Des machines de cette puissance ne peuvent être obtenues qu'en donnant à la chaudière un diamètre considérable et en donnant un très-grand développement au foyer. Dans les machines du chemin de fer du Nord, la surface de chauffe du foyer paraît un peu faible, ainsi que celle des tubes; pour la ramener aux dimensions résultant de la double règle que j'ai appliquée aux calculs précédents, il faudrait reporter le bâti à l'extérieur, en profiter pour élargir le foyer sans l'allonger et y placer un bouilleur longitudinal de la forme de ceux qu'on emploie assez généralement en Angleterre et que je décrirai plus loin; on pourrait par suite placer vingt-cinq à trente tubes de plus et on obtiendrait :

	m. q.
Surface de chauffe du foyer.	13
Surface de chauffe des tubes.	130
Surface de chauffe totale.	143

La machine satisferait alors à toutes les règles que j'ai indiquées; le diamètre des roues un peu grand con-

vient d'ailleurs à une ligne dont le trafic est aussi considérable et aussi varié.

J'ai donné aux paragraphes précédents un développement peut-être trop considérable; je m'y suis trouvé entraîné au fur et à mesure que j'obtenais les résultats qui s'y trouvent consignés, sur lesquels je n'avais aucune idée arrêtée d'avance, et qui dans quelques cas même se trouvaient en désaccord avec mes opinions antérieures; j'ai pensé qu'il était utile de porter la discussion sur ce terrain, pour provoquer au moins la recherche des règles propres à guider les constructeurs de machines, qui n'ont eu jusqu'ici que le tâtonnement et la comparaison de quelques faits isolés, pour se diriger dans une question aussi délicate que celle du choix des éléments qui constituent la puissance d'une machine. Je n'espère pas avoir résolu la question, je la livre entamée aux ingénieurs qui pourront y introduire des éléments plus nombreux et une connaissance plus complète des mérites et des défauts des diverses machines qui ont été construites jusqu'ici.

On fait un usage fréquent en Angleterre des bouilleurs placés dans le foyer, au moyen desquels on augmente dans une forte proportion la surface de chauffe directe. En France cette disposition n'est pas généralement en faveur; cela résulte surtout de ce qu'on a fait usage de bouilleurs transversaux qui sont une grande gêne pour la conduite du feu et qui deviennent un obstacle pour faire tomber rapidement les barreaux de la grille lorsqu'il faut jeter le feu par suite d'un accident, d'autant plus que ces bouilleurs ont été en général placés dans des foyers de trop petite dimension; d'ailleurs ces bouilleurs transversaux mal disposés pour faciliter le dégagement de la vapeur ont donné lieu souvent à des fuites et à un entretien dispendieux. Dans les

machines les plus récentes construites en Angleterre, on fait usage d'un bouilleur longitudinal qui forme une cloison divisant le foyer en deux chambres séparées et s'élevant jusqu'au plafond, à l'exception d'une échancrure ménagée dans la partie qui avoisine les tubes, pour faciliter leur pose et leur nettoyage, et en même temps pour éviter d'en réduire le nombre. Cette disposition n'est applicable que lorsqu'on donne au foyer la plus grande largeur possible en reportant le bâti à l'extérieur des roues; elle a l'inconvénient de nécessiter l'emploi de deux portes de chargement, mais, outre l'augmentation considérable de surface de chauffe qu'elle donne, elle a plusieurs avantages : elle consolide le ciel du foyer sur la moitié au moins de sa longueur, et facilite le dégagement de la vapeur produite par les parois même du bouilleur au lieu de le rejeter entre les tubes ou sur les parois latérales, où elle pourrait produire des chambres de vapeur nuisibles à la conservation du métal; en outre, et c'est là un avantage qui paraît aujourd'hui très-important, elle réduit à de justes proportions la surface de la grille comparativement à celle des parois, qui est proportionnelle à la somme de la longueur et de la largeur du foyer, tandis que la première est proportionnelle au produit de ces deux dimensions.

6° Mécanisme de distribution.

Toutes les machines sont pourvues de la coulisse de Stephenson, qui sert aussi bien pour faire varier la détente que pour changer la marche; en général les tiroirs sont commandés directement et sans renvoi de mouvement. La coulisse a subi dans un certain nombre de machines une modification qui ne change rien à ses propriétés, mais qui n'est convenablement applicable

que lorsqu'il existe une grande distance entre les cylindres et l'essieu moteur. La coulisse est suspendue par son milieu à un point fixe au moyen d'une bielle plus ou moins longue, suivant l'espace qui reste libre sous la chaudière; c'est le coulisseau, attaché à l'extrémité d'une bielle articulée commandant le tiroir, qui est mobile et sur lequel agit le levier de relevage; la coulisse a par suite sa convexité tournée vers les cylindres. Hawthorn a imaginé une autre disposition qui paraît également convenable : la coulisse est attachée par son milieu à la tige du tiroir au moyen d'une articulation et oscille autour de l'axe de cette articulation; les deux barres d'excentrique sont attachées à un coulisseau dont la longueur entre les points d'attache est égale à la moitié de l'espace libre dans la coulisse et qui est commandé par l'arbre de relevage.

Ces deux modifications de la coulisse paraissent devoir donner une distribution plus régulière que la dis position habituellement employée; elles soulagent d'ailleurs l'arbre de relevage et en rendent la manœuvre plus sûre.

Je ne parlerai pas ici de la construction même et des propriétés de la coulisse; ces propriétés ont été complétement étudiées par les ingénieurs français, et surtout par M. l'ingénieur des mines Phillips, qui vient de donner la théorie géométrique de la coulisse et de fournir aux constructeurs, par son remarquable travail, le moyen de déterminer à priori et sans tâtonnement toutes les questions qui se rattachent à cet ingénieux mécanisme. Il est à désirer que M. Phillips applique sa théorie aux deux dispositions dont je viens d'indiquer le principe, et fixe les constructeurs sur leur mérite et sur la préférence qu'il conviendrait de leur donner.

J'ai remarqué sur le chemin de fer des Eastern-

Counties une modification très-simple et très-heureuse appliquée aux tiroirs de distribution, pour remédier à l'étranglement des lumières qui est le défaut principal de la distribution par la coulisse de Stephenson. On sait en effet que lorsque la détente est un peu prolongée, les orifices maxima d'introduction sont réduits à quelques millimètres de largeur; il en résulte que la pression de la vapeur éprouve dans le cylindre une réduction considérable, ce qui rend l'emploi de la vapeur moins avantageux et limite l'étendue des parcours pendant lesquels on peut faire usage d'une forte détente. On a imaginé de remplacer les bords minces du tiroir par des bords massifs qui ont toute sa hauteur et lui donnent extérieurement la forme d'un parallélipipède. Dans l'épaisseur du recouvrement, on perce de chaque côté une lumière additionnelle de 10 à 15 millimètres de largeur; la face supérieure du tiroir, est planée, et sur cette face repose une plaque de fonte, qui porte aussi deux lumières, mais qui n'est mobile que dans le sens perpendiculaire au plan du tiroir pour racheter l'usure. Les lumières additionnelles du tiroir sont démasquées et fermées en même temps que les lumières du cylindre et de quantités égales, de telle sorte que l'admission est doublée. Cette disposition éminemment simple pourra être appliquée dans beaucoup de cas sans qu'il soit nécessaire de fondre de nouveaux cylindres; je n'ai pas eu de renseignements précis sur les économies de combustible qu'elle permet de réaliser, mais elle m'a été signalée comme très-avantageuse, ce qui sera du reste évident pour tous ceux qui ont étudié avec soin la distribution par la coulisse.

Quelques essais ont été faits, notamment par Hawthorn, pour diminuer la pression sur les tiroirs; mais la question, peut-être moins complétement étu-

diée qu'en France, ne paraît pas encore avoir reçu, de l'un ou de l'autre côté du détroit, une solution décisive. Cette question a un grand intérêt, car la pression exercée sur les tiroirs ordinaires est considérable; il en résulte une déperdition notable de travail utile et surtout une prompte usure du mécanisme de distribution; il y aurait donc intérêt à ce qu'elle fût résolue d'une manière simple et efficace, mais je ne pense pas qu'on puisse ainsi obtenir des résultats comparables à ceux que produirait l'augmentation des ouvertures maxima d'introduction pendant la détente, et malheureusement les deux améliorations paraissent incompatibles.

Je n'ai pas remarqué de machines dont l'échappement fût variable; les tuyaux d'échappement ont une grande section et de larges orifices, et, comme je l'ai déjà indiqué, on donne aux chaudières une surface de chauffe considérable. Les ingénieurs anglais pourraient profiter de l'heureuse application faite en France de l'échappement variable pour ramener à des proportions moins considérables l'appareil de vaporisation et réduire le poids des machines.

7° Roues et bandages.

On ne fabrique plus en Angleterre, pour les machines et les tenders, que des roues en fer forgé, dans lesquelles le moyeu forme une seule pièce avec les rais et le faux cercle. On a complétement renoncé, comme en France, aux roues avec fer d'angle sans faux-cercle de Stephenson. Les bandages sont toujours fabriqués avec des fers de choix et avec des soins tout particuliers, soit à Lowmoor, soit dans les usines concurrentes. Sur le Great-Western seulement on a adopté d'une manière exclusive les bandages en fer avec mise d'acier sur la surface de roulement; on ne paraît pas avoir

essayé d'une manière un peu suivie l'emploi des bandages entièrement en acier cémenté ou fondu. C'est là cependant un perfectionnement d'une haute importance pour la locomotion, et on ne peut qu'encourager les essais tentés récemment sur divers chemins de fer français. La principale difficulté paraît être celle de l'embattage et du centrage, résultant de la difficulté de tourner les bandages après la trempe qui résulte de leur immersion dans l'eau; on peut recourir à l'emploi de la meule pour mettre les bandages au rond après la pose, comme on le fait sur le Great-Western, ou mieux encore recourir au procédé employé depuis longtemps sur le chemin de fer de Saint-Étienne à Lyon, pour fixer les bandages sur les roues après qu'ils auraient été tournés et trempés. Ce procédé, qui consiste dans l'emploi de cales en bois et en fer intercalées avec précision entre le bandage et le faux-cercle, convient du reste parfaitement pour des bandages que leur nature même rend plus sensibles aux chocs et aux vibrations et qui ont besoin d'une certaine élasticité dans le moyeu sur lequel ils sont fixés. On arriverait sans doute par cet artifice à employer en toute sécurité des bandages en acier fondu, coulés d'une seule pièce sur un petit diamètre et élargis au laminoir, comme on le fait maintenant en Angleterre et même en France pour les bandages ordinaires en fer. Des bandages en acier trempé, conservant pendant un temps de service très-long leur profil normal, donneraient sans aucun doute une triple économie : sur l'entretien des bandages eux-mêmes, sur l'usure des rails et sur l'effort de traction, et cette économie compenserait très-largement l'augmentation des frais de premier établissement. Pour appliquer l'acier fondu à la fabrication des bandages, il faut prendre de l'acier doux au minimum de carburation et par suite

plus facile à souder et moins cassant que l'acier fondu fabriqué pour les usages ordinaires.

L'emploi des bandages fabriqués entièrement en acier et en acier fondu sera singulièrement facilité si les essais exécutés depuis peu de temps à Seraing sur une grande échelle et jusqu'ici avec toute apparence de succès, pour la fabrication de l'acier naturel dans les hauts-fourneaux au coke et dans les fours à puddler, conduisent à une production manufacturière qui réaliserait des abaissements imprévus jusqu'ici dans le prix de cette précieuse matière.

Ainsi que je l'ai dit, on emploie sur plusieurs chemins anglais des bandages en fer soudés sur un petit diamètre et amenés à leur dimension par le laminage sur trois cylindres ; ces bandages qui peuvent être également fabriqués sans soudure n'ont besoin ni d'être alésés à l'intérieur, ni d'être tournés à l'extérieur, lorsque l'embattage ne les déforme pas ; ce procédé ajoute à une économie sur les frais de pose l'avantage de conserver la surface extérieure du métal qui offre plus de dureté que les parties intérieures.

8° Suspension.

On voit sur un assez grand nombre de machines des ressorts de suspension combinés avec des balanciers, imités des machines que l'on construit depuis longues années en Amérique. Dans d'autres cas un même ressort a ses extrémités appuyées sur les boîtes à graisses de deux paires de roues adjacentes, de telle sorte que le châssis n'est relié que par deux points avec deux paires de roues. L'emploi de ces dispositions a pour effet de faire disparaître l'indépendance des roues dont les ressorts se débandent ou se compriment, suivant les inégalités de la voie, de manière à faire varier dans des

limites très-étendues la pression sur les rails; lorsqu'au contraire un ressort agit sur deux essieux il oscille autour de son sommet et ses extrémités suivent le mouvement des boîtes à graisse entraînées avec les essieux par les inflexions des rails; les mêmes variations de pression ne peuvent pas se produire, au moins dans des limites aussi étendues. Le type le plus complet de suspension à répartition constante de la charge sur les points d'appui est la nouvelle machine à axe coudé intermédiaire de M. Crampton; les quatre roues portantes sont groupées à l'avant et sont chargées deux à deux et de chaque côté par l'intermédiaire d'un seul ressort renversé attaché par son sommet au bâti et reposant par ses deux extrémités sur les boîtes à graisse, exactement comme dans les avant-trains mobiles des châssis américains; la roue motrice n'a de son côté qu'un ressort transversal. La chaudière, le bâti et tout le mécanisme qu'il supporte reposent donc sur les sommets des trois ressorts et par conséquent sur trois points seulement, entre lesquels la répartition de la charge ne peut pas changer; chaque ressort pouvant d'ailleurs jouer autour de son sommet ou de l'articulation qui sert de point d'attache au bâti, l'une de ses extrémités s'abaisse avec la boîte à graisse correspondante, tandis que l'autre se relève, de telle sorte que les deux roues correspondant au même ressort conservent à peu près leur charge normale; je dis à peu près, parce que le jeu des ressorts n'est pas instantané et parce que l'inertie de la machine ne permet pas que le plan des trois points d'attache se déplace instantanément suivant les inégalités de la voie; il y a même lieu de croire que dans les grandes vitesses l'avantage de cette suspension, qui a pour but la conservation de la répartition des poids, est plus théorique que réel, surtout si les iné-

galités de la voie qui tendent à produire le mouvement de roulis se répètent fréquemment. Il y a là du reste, même avec des rails rigides, s'ils sont déformés par le défaut d'entretien, des effets analogues à ceux qui se produisent sur les barres flexibles. Ce serait donc une grande erreur que de se croire dispensé, par l'adoption de ce mode de suspension, d'entretenir la voie avec le plus grand soin.

9° Machines tenders.

L'emploi des machines portant leur eau et leur coke est assez répandu en Angleterre, mais on n'en fait généralement usage que pour les trains légers et pour les petits parcours. On prolonge la plateforme du mécanicien qui repose sur l'essieu d'arrière, et on y attache une caisse à eau de forme prismatique en dessous et en forme de fer à cheval en dessus, de manière à ménager l'espace nécessaire pour placer 4 à 500 kilogrammes de coke. Cette disposition convient aussi pour les machines de renfort, sur les plans inclinés, qui ne font jamais que des parcours assez faibles; mais elle convient peu pour les machines qui doivent effectuer de longs parcours et développer un effort de traction considérable; on est alors conduit, pour donner au réservoir d'eau et au magasin de coke une capacité suffisante, à augmenter au-delà de ce qui est nécessaire et convenable la charge des essieux; il vaut mieux faire un tender léger, sur lequel on charge une grande quantité de coke, suffisante pour l'aller et le retour, et en profiter pour éviter l'établissement de dépôts et d'un service de distribution sur un grand nombre de points de la ligne.

§ 2. *Voitures et wagons.*

Les voitures affectées sur les chemins de fer anglais au service des voyageurs, se divisent en trois classes :

première classe, deuxième classe et troisième classe. Les voitures de première classe sont seules garnies, celles de seconde sont fermées par des châssis vitrés, celles de troisième sont couvertes, mais non fermées ; sur quelques chemins, on trouve des voitures de troisième classe découvertes qui servent l'été seulement. Tous les voyageurs étrangers, en arrivant en Angleterre, sont frappés du peu de luxe avec lequel sont établies les voitures de première classe ; quoique les banquettes ne comprennent en général que trois places divisées en stalles, chaque voyageur ne dispose que d'un espace assez restreint ; les formes extérieures sont disgracieuses, les garnitures sont sans élégance et d'une simplicité sans goût ; les banquettes sont trop élevées au-dessus du plancher, les lampes sont d'un petit modèle, faisant saillie dans les caisses, et ne projetant qu'une lumière douteuse ; en outre, ces voitures sont le plus souvent assez mal tenues. Sous ces différents rapports, elles restent bien au-dessous des voitures analogues établies sur les chemins de fer français et sur beaucoup de chemins de fer allemands. Cette différence doit tenir en partie à ce qu'en Angleterre les voitures à voyageurs ont été construites principalement par des mécaniciens, tandis qu'en France cette industrie s'est trouvée, dès l'origine des grandes fournitures de matériel, entre les mains des carrossiers qui y ont introduit toutes les ressources de leur art.

A part les critiques qui précèdent et que justifie suffisamment le prix exorbitant des places de première classe, ces voitures se font en général remarquer par leur stabilité et par la douceur de leur mouvement, quoiqu'elles roulent le plus souvent sur des voies médiocrement entretenues. La stabilité résulte de la rigidité donnée aux ressorts de traction et de choc, que l'on

serre fortement les uns contre les autres, au peu de largeur des caisses qui sont moins soumises que celles de nos voitures au mouvement de roulis, et au grand écartement des essieux qui se trouve maintenant porté à 3^{m},50 environ. Cependant on éprouve encore quelquefois un mouvement de lacet très-prononcé; c'est alors au défaut d'entretien des roues et à l'état de la voie qu'il faut l'attribuer. Ces voitures ont d'ailleurs une très-bonne suspension formée de ressorts aplatis, de 1^{m},80 de longueur, très-flexibles et reliés au châssis par l'intermédiaire d'une sorte de soupente en fils métalliques et en cuir qui les place dans d'excellentes conditions; les ressorts sont médiocrement fabriqués, ont des formes peu rationnelles, mais en somme la suspension est très-bonne quant aux résultats sensibles pour le voyageur. Les recherches théoriques de M. Phillips sur la forme à donner aux ressorts et les importantes applications qu'il en a faites, spécialement sur le chemin de fer du Nord, nous permettent maintenant de résoudre, directement et à coup sûr, toutes les questions relatives à la suspension des wagons et d'arriver aux résultats que les constructeurs anglais n'obtiennent que par des tâtonnements nombreux, et souvent d'une manière imparfaite.

Les voitures de seconde classe sont à peu près l'équivalent de nos voitures de troisième classe, lorsqu'elles sont fermées comme le prescrivent les cahiers des charges des dernières concessions; les banquettes en bois sont élevées, étroites et rapprochées les unes des autres; on a réuni en un mot dans ces voitures tout ce qui est propre à en éloigner le public et à l'attirer vers la première classe : ces voitures sont cependant très-suivies, grâce à l'élévation des tarifs. Les voitures de troisième classe ne trouvant place que dans les trains parlemen-

taires n'entrent relativement qu'en petit nombre dans la composition du matériel d'une grande ligne; indépendamment de ce que les ouvertures des portières ne sont pas fermées par des châssis à vitre, elles sont encore plus incommodes par la forme et la dimension des siéges que les voitures de deuxième classe.

Sur les chemins de l'intérieur à faible circulation et pour les parcours de Londres vers les différentes villes de l'Écosse, qui ne reçoivent par chaque convoi qu'un nombre restreint de voyageurs, on fait assez fréquemment usage de voitures mixtes ayant un compartiment de première classe entre deux compartiments de seconde.

Les voitures de voyageurs sont en général à quatre roues et à trois compartiments. Sur les chemins où l'on a fait primitivement usage de voitures à six roues on a supprimé, soit dans les constructions neuves, soit dans le matériel existant, l'essieu du milieu. On trouve les voitures à quatre roues plus stables et plus sûres; cette opinion est parfaitement fondée depuis qu'on fabrique des essieux assez forts et d'assez bonne qualité pour qu'ils ne cassent plus, surtout si l'on remarque qu'en général dans la construction des voitures à six roues, on avait négligé de donner aux ressorts du milieu moins de tension et plus de flexibilité qu'aux ressorts extrêmes; ces voitures, telles qu'on les a faites jusqu'ici, donnent d'ailleurs une augmentation de résistance au mouvement qui n'est pas entièrement négligeable, lorsqu'elle se reproduit pour la totalité des véhicules.

Sur le chemin de fer du South-Eastern on a mis en service un assez grand nombre de voitures à huit roues également espacées sous le châssis; ces voitures sont composées de deux voitures, de dimension ordinaire, réunies par des boulons; cette disposition est néces-

saire pour faciliter leur sortie des ateliers de construction et de réparation, et pour éviter l'emploi dispendieux de bois d'une très-grande longueur. Pour faciliter le passage de ces immenses véhicules dans les courbes de petit rayon et surtout dans les changements de voie, on donne aux boîtes à graisse un jeu total de $0^m,15$ à $0^m,20$ dans les plaques de garde et on attache les ressorts à la caisse au moyen d'une double menotte, l'une très-courte fixée au ressort par un boulon d'articulation, l'autre très-longue placée dans un plan parallèle à l'axe de la voiture, ayant son sommet en haut et son articulation en bas; celle-ci est fixée sur une traverse armée placée au-dessous du châssis. Je n'insisterai pas sur le mode de construction de ces voitures dont tout le monde a vu un spécimen à l'exposition. L'expérience ne leur a pas d'ailleurs été favorable; on s'accorde à reconnaître qu'elles donnent une augmentation notable de résistance dans les courbes. A part cet inconvénient et celui de ne pouvoir pas être manœuvrées sur les plaques tournantes des gares, les voitures à voyageurs d'une grande longueur ont certains avantages qui méritent de fixer l'attention : le grand écartement des supports extrêmes, surtout si l'on a soin de leur donner plus de charge qu'aux supports intermédiaires, rend les véhicules très-stables, c'est-à-dire peu sensibles aux causes qui produisent le mouvement de lacet. En outre leur poids considérable, en raison de leur dimension, et le plus grand nombre des points d'appui, les rendent moins sensibles aux inégalités de la voie, qui n'ont en grande partie pour effet que de faire jouer les ressorts sous la voiture sans affecter sa masse.

L'emploi de ces grands wagons à huit roues ne paraît pas devoir se multiplier en Angleterre, mais on pourra,

comme l'a fait la compagnie du South-Eastern, réduire le nombre des roues à six, en fixant celles des extrémités dans les plaques de garde et en adoptant pour celles du milieu le mode de suspension à jeu transversal que j'ai indiqué.

Toutes les fois qu'on fera bon marché des facilités que donnent les plaques tournantes pour les manœuvres de gare, on pourra placer le matériel à voyageurs dans des conditions beaucoup plus favorables qu'il ne l'est actuellement, en augmentant la capacité des voitures et l'écartement des essieux extrêmes, en ajoutant au besoin un troisième essieu ayant un jeu assez marqué dans le sens transversal comme dans les nouvelles voitures du South-Eastern. L'augmentation de dimension qu'il pourra être nécessaire de donner aux essieux, à leurs fusées, aux boîtes à graisse et aux ressorts ne peut pas être mise en balance avec les économies réalisées sur les autres parties de la construction et résultant de l'augmentation de stabilité des véhicules et de la moindre proportion du poids mort. J'ai exprimé plus haut l'opinion qu'une charge de 10 tonnes par essieu était une limite convenable pour des machines; une telle charge est nécessairement une cause d'usure spéciale pour la voie; mais il y a un moyen terme à prendre entre les nécessités de l'exploitation et celles de l'entretien de la voie, et c'est à ce point de vue que j'ai adopté ce chiffre. Pour les wagons destinés au service d'une voie construite avec des rails de forte dimension et tracée avec des courbes d'assez grand rayon, il n'y aurait certainement aucun inconvénient appréciable à donner aux essieux une charge de 4 à 5 tonnes, et, par exemple, à construire des voitures à six roues dont les extrêmes seraient espacées de 5 à 6 mètres qui comprendraient pour la première classe cinq comparti-

ments ou même quatre compartiments doubles et deux coupés, six compartiments pour la seconde classe et six ou sept pour la troisième classe ; il suffirait pour cela de donner aux essieux extrêmes une charge de 4 à 5 tonnes et à l'essieu intermédiaire une charge de 2 à 3 tonnes. L'essieu du milieu pouvant se déplacer dans le sens transversal et les essieux extrêmes ayant une certaine facilité de convergence par suite de l'inclinaison des menottes de suspension et de l'élasticité des sous-tendeurs et du jeu laissé aux boîtes à graisse dans les plaques de garde, des voitures ainsi construites ne présenteraient pas un accroissement de résistance très-notable dans les courbes. C'est d'ailleurs sur des données semblables que sont construites une grande partie des voitures à voyageurs employées sur les chemins de fer allemands, sur lesquelles j'ai eu déjà l'occasion d'appeler l'attention des ingénieurs ; ces voitures, qui contiennent soixante et jusqu'à quatre-vingts et même cent voyageurs, sont portées sur trois essieux distants deux à deux de 3 mètres à $3^{m},50$; c'est également sur un principe analogue que la compagnie du chemin de fer du Nord a basé la construction de ses wagons à houille, qui porteront sur quatre roues 10 tonnes de charge et environ 3 tonnes 1/2 à 4 tonnes de poids mort.

On a été conduit, pour donner aux appareils la puissance que nécessite sur les grandes lignes la vitesse et l'importance de la circulation actuelle, à faire de lourdes machines exerçant sur les rails des pressions considérables ; il a fallu par suite augmenter le poids des rails, c'est une nécessité à laquelle il a fallu se soumettre, mais ce serait bien le moins que de chercher à en profiter pour améliorer les conditions de construction du matériel roulant. L'augmentation de la charge sur les

roues de wagons, combinée, s'il le faut, avec une augmentation de force des essieux, dans le but d'obtenir une plus grande capacité des véhicules et une diminution du poids mort, est un système encore un peu nouveau, dans lequel on trouve cependant des précédents très-importants et qui, dans mon opinion, mérite d'appeler sérieusement l'attention des ingénieurs. L'augmentation du poids des rails motivée sur les nécessités de la locomotion, le progrès considérable obtenu depuis dix années dans la fabrication des essieux, les améliorations déjà réalisées et surtout celles qui restent encore à faire dans la fabrication des bandages, tout concourt à favoriser des essais qui seraient entrepris dans cette direction. Pour les voitures à voyageurs, c'est certainement une gêne que d'avoir des véhicules d'une grande longueur, qu'il devient difficile de faire entrer dans les remises, qu'on ne peut plus manœuvrer sur des plaques tournantes, qui ont une capacité souvent trop grande lorsqu'il faut compléter un convoi; mais s'il n'y avait pas tous ces inconvénients à prendre en considération, la question serait jugée depuis longtemps; l'étude à faire est précisément la comparaison des inconvénients et des avantages.

En diminuant le poids mort, on diminuerait en même temps d'une manière sensible l'action de l'air sur les convois en marche, car on réduirait leur longueur, le nombre des intervalles vides entre les wagons, et le nombre des roues. L'influence des intervalles compris entre les wagons a été établie par des expériences directes; c'est elle qui explique le surcroît d'effort de traction nécessaire, à poids égal, pour remorquer des convois contenant un certain nombre de voitures de messageries chargées sur trucks. A ce point de vue, on remarque avec intérêt le matériel du chemin de fer

de ceinture et du chemin de fer de Londres à Blackwall, dont les tampons de choc fort courts sont engagés en partie sous les caisses, de telle sorte qu'il ne reste entre deux voitures, pendant la marche, qu'un intervalle d'environ $0^m,20$.

2° Wagons à marchandises.

Les wagons à marchandises sont de formes très-diverses; cependant on remarque une tendance générale à remplacer les anciens wagons plats et en forme de tombereau, dans lesquels la marchandise était recouverte par des bâches mobiles, par des wagons fermés au moyen d'un toit en zinc ou mieux en tôle ondulée galvanisée, qui se soutient d'elle-même. Ces wagons ont des portes à coulisse ou battantes, quelquefois d'un seul côté; ils sont en général beaucoup plus bas et d'une moins grande capacité que les nôtres. Souvent le toit est interrompu, dans la partie intermédiaire qui correspond aux portes, et remplacé par un panneau volant ou par une bâche, de manière à laisser un espace libre pour le chargement ou le déchargement des colis au moyen de grues, dont toutes les gares sont garnies à profusion. Ces wagons ne servent jamais au transport des bestiaux; ceux-ci sont placés dans des wagons spéciaux qui ne servent qu'à cet usage.

Les wagons découverts en forme de tombereau, c'est-à-dire dont les côtés latéraux ont un mètre environ de hauteur et dont les bouts s'élèvent en segment circulaire ou en triangle pour retenir le chargement et fixer la bâche, présentent une disposition que l'on ne rencontre pas en France dans les wagons de même nature. La porte, qui chez nous doit s'ouvrir librement pour faciliter le chargement à bras des colis de toute forme et de toute dimension, est au contraire surmontée d'une

barre, qui forme linteau et sur laquelle vient battre la porte; par suite on peut appliquer sur tout le pourtour de la caisse un cadre en fer plat qui lui donne une extrême solidité. L'emploi général des grues permet seul l'application de ce mode de construction fort utile pour la solidité de ces wagons.

Les wagons à bestiaux sont presque toujours découverts et ont une partie au moins de leurs parois à claire-voie; les portes sont fréquemment formées par des panneaux qui se rabattent en guise de pont. On voit souvent des wagons à moutons à deux étages, mais souvent aussi on transporte ces animaux, ainsi que les porcs, dans les wagons à bœufs. Ces différents wagons ne sont que très-rarement nettoyés, et leur plancher reste couvert en permanence d'une couche de fumier de plusieurs centimètres d'épaisseur. Le système suivi en France, qui consiste à avoir des wagons à marchandises fermés d'une capacité suffisante pour recevoir les bœufs et les chevaux, est évidemment préférable; on réalise ainsi une économie notable sur les frais d'établissement du matériel et sur la circulation à vide des wagons. La nécessité de les tenir propres a d'ailleurs l'avantage de les empêcher de se détériorer rapidement.

Il existe deux systèmes distincts de wagons à houille, les uns à bords élevés ayant la forme de troncs de pyramide renversée s'ouvrant par-dessous au moyen d'une ou de deux trappes; les autres ont des bords droits peu élevés et le fond est formé par quatre plans inclinés qui viennent aboutir à une double trappe, qui sert, comme dans le premier système, à opérer le déchargement. Pour décharger ces wagons, il est toujours nécessaire de les amener sur des estacades élevées au-dessus du sol environnant. Le premier système est employé surtout sur les chemins spéciaux des houillères

du comté de Durham ; l'autre est employé principalement sur les grandes lignes qui aboutissent à Londres et où les wagons à houille doivent affecter des formes analogues à celles des autres wagons à marchandises, pour qu'on puisse les faire entrer convenablement dans la composition de tous les convois. Les premiers ont leurs caisses en tôle ou en panneaux de bois sur cornières en fer ; les derniers sont en bois. Le système le plus convenable est certainement celui de Newcastle, dont le châssis pourrait être facilement disposé pour se raccorder avec les châssis des autres véhicules ; ils joignent à une grande solidité une réduction notable de poids mort. On ne paraît pas se préoccuper en Angleterre des chances d'accident que peut présenter la chute spontanée des trappes pendant la marche.

On remarque une certaine tendance à augmenter la capacité des wagons à houille. Les wagons du Great-Northern contiennent 6 tonnes 1/4 ; sur le Great-Western, on arrive à une charge de 10 tonnes. Mais nulle part on n'est encore entré en Angleterre, sur la voie étroite, aussi résolument que notre compagnie du chemin de fer du Nord, dans le système des véhicules à essieux fortement chargés ; elle débute par la construction de quatre cents wagons à houille à quatre roues pesant vides 3 tonnes 1/2 à 4 tonnes 1/2 et contenant 10 tonnes de houille. Ces wagons ont la forme des wagons-tombereaux anglais dont j'ai parlé plus haut et se déchargent par des portes latérales. Les ingénieurs anglais auxquels ont été soumises les vues de la compagnie du chemin de fer du Nord, sur l'organisation de son service de houille, ont en général critiqué l'emploi de wagons d'une aussi grande capacité ; mais toutes les objections qu'on peut faire à ce système peuvent être facilement combattues. Pour obtenir la solidité des

wagons ordinaires, il suffit d'augmenter le diamètre des essieux et d'allonger leurs fusées de quelques centimètres ; la difficulté de manœuvre dans les gares se résout par l'emploi des chevaux, qui présente une simplification de service et une économie dans tous les cas. Des voies qui supportent des charges de 10 à 12 tonnes par essieu de machines marchant à grande vitesse, ne doivent pas être sensiblement dégradées par des wagons ayant à la vérité une charge de 7 tonnes par essieu, mais ne marchant qu'à petite vitesse. L'augmentation de stabilité des véhicules de cette nature suffirait peut-être d'ailleurs à elle seule pour compenser l'influence nuisible du poids sur la voie, si à la limite de 7 tonnes par essieu elle commençait à se manifester. Je ne parle pas ici de l'économie qui doit résulter pour la traction de la diminution de surface des convois, de la diminution très-notable du poids mort qui se trouve réduit au-dessous des 5/10 du poids total.

Les wagons à marchandises proprement dits sont généralement construits en bois ; cependant on rencontre assez souvent des wagons construits en fer. Ce système de construction est dispendieux, même en Angleterre, et donne lieu à de grosses réparations, lorsque les châssis sont déformés par les chocs résultant d'accidents ; il semble donc que c'est avec raison qu'on s'est abstenu jusqu'ici d'en faire usage en France. Sur le Great-Northern, l'une des grandes lignes les plus récentes et dont le matériel est construit par l'un des ingénieurs les plus expérimentés de l'Angleterre, l'emploi exclusif du fer n'a eu lieu que pour la construction des wagons à coke affectés au service de la compagnie ; ces wagons, servant de magasins et restant par suite très-longtemps soumis à une charge assez forte, ont besoin d'une solidité toute particulière.

3° Détails de construction.

Partout on remarque le soin particulier que les ingénieurs mettent à donner aux châssis des wagons à marchandises une extrême rigidité ; on y arrive par une construction massive, par l'emploi de ferrures très-fortes, par l'application d'entretoises longitudinales et transversales en fer et surtout en armant les brancards de fers d'angle ou de plate-bandes en fer. Cette précaution est rendue nécessaire par les conditions même du service ; les wagons passent fréquemment d'une ligne sur l'autre et sont souvent manœuvrés dans les gares, ou remorqués sur la ligne, par les agents des compagnies intermédiaires ou d'embranchement. Dans les gares d'où rayonnent plusieurs lignes, les trains sont soumis à des manœuvres de décomposition et de recomposition, et de plus ces manœuvres se font avec des machines et des chevaux et toujours rapidement et inévitablement avec peu de soin ; le matériel est donc soumis à des causes d'avarie plus graves que s'il restait toujours entre les mains des agents de la compagnie à laquelle il appartient, et cependant il faut qu'il puisse marcher longtemps sans entretien avant de rentrer au point de départ, où il peut seulement être visité et réparé ; il est donc nécessaire de lui donner une solidité à toute épreuve.

Les mêmes inconvénients ne se manifesteront pas au même degré en France, où les lignes principales rayonnent d'un centre commun et où il n'existera certainement pas ce mélange à peu près inextricable de matériel qu'on remarque en Angleterre. Dans certains cas les wagons chargés circuleront d'une ligne sur l'autre ; par exemple, du Havre à Strasbourg ou à Mulhouse pour le transport des cotons, de Quiévrain ou de So-

main dans l'Ouest, pour le transport de la houille. Mais il y a tout lieu de croire qu'en général il s'opérera un transbordement dans les gares de Paris. Lorsque le parcours réciproque aura lieu d'une ligne sur l'autre au delà de Paris, les wagons auront un itinéraire fixé à l'avance et des arrangements pourront intervenir, comme cela a lieu dès à présent sur les tronçons d'une même ligne principale, pour assurer le bon entretien et la conservation du matériel. La situation n'est pas la même que pour les lignes anglaises qui forment au nord de Londres un réseau dont les fils se croisent dans tous les sens.

On doit attribuer en partie à la même cause l'usage, assez généralement répandu en Angleterre, des ressorts de choc et de traction pour les wagons à marchandises. Cette disposition, du reste, est toujours favorable à la conservation du matériel pour amortir les chocs dans les manœuvres de gare, à l'arrêt et au départ des trains dans les stations; avec quelques précautions que ces manœuvres soient faites, on ne saurait trop la recommander. En France, il y a pour l'adopter un motif qui n'existe pas en Angleterre, c'est l'usage des trains mixtes, dans lesquels des wagons chargés de marchandises sont accouplés avec des voitures de voyageurs; l'emploi de ressorts de choc et de traction pour les wagons rend cette combinaison moins incommode pour les voyageurs et augmente jusqu'à un certain point la sécurité de la circulation, surtout pour les cas accidentels de déraillement ou de collision.

L'emploi des ressorts de choc et de traction est surtout nécessaire pour les grands wagons couverts que l'on ne retrouve pas en Angleterre et que nous avons disposés pour recevoir indifféremment des bestiaux ou des marchandises de toute nature; dans ces wagons,

l'assemblage des parties hautes de la caisse avec le châssis est une chose difficile, au point de vue des chocs qui ont toujours lieu à la base de la caisse. Cette nécessité se révélera encore plus lorsque l'usage des chevaux pour les manœuvres de gare sera plus répandu sur nos chemins de fer.

On remarque fréquemment aussi des châssis de voyageurs armés de plates-bandes en fer appliquées extérieurement sur les brancards; elles ont environ 7 à 8 millimètres d'épaisseur sur $0^m,10$ de hauteur et forment un V très-obtus dont la pointe est tournée vers le sol. On se rend difficilement compte de l'utilité de cette dernière disposition, qui complique la fabrication et qui diminue la résistance du brancard armé aux chocs qu'il est exposé à recevoir; si l'on veut faire remplir aux deux branches du V l'office de tirants, pour empêcher le châssis de fléchir aux extrémités, c'est dans le sens inverse qu'il aurait fallu le placer. L'emploi d'un fer d'angle rectiligne, que l'on voit appliqué sur tous les wagons à marchandises du South-Western, ou des plaques de tôle mince, qui doublent sur toute leur hauteur les brancards des voitures et des wagons du chemin de fer de Montereau à Troyes, paraît dans tous les cas préférable.

On commence à faire un fréquent usage de la tôle ondulée galvanisée pour couvrir les wagons à marchandises et pour former les parois de leurs caisses; les panneaux ont une grande portée, et la construction de la caisse se trouve simplifiée. Je n'ai pas recueilli de renseignements sur l'économie que peut procurer ce mode de construction; c'est surtout aux wagons à bagages qu'il conviendrait d'en essayer l'application.

Pour les voitures à voyageurs, on arrive maintenant sur beaucoup de chemins à supprimer complétement

la peinture extérieure en construisant les châssis, les montants, traverses et panneaux des caisses en bois exotiques, qui sont importés en grande quantité, comme lest, par les navires qui font la navigation des Indes, et qui coûtent moins cher que du bois de chêne de bonne qualité. On se contente de vernir les surfaces extérieures. Ce système, dans les conditions où se trouve l'Angleterre, paraît économique comme construction et comme entretien, mais il n'est pas certain qu'il présente le même avantage en France, où les bois exotiques coûtent plus qu'en Angleterre, et où le climat moins humide sera moins favorable à la conservation des panneaux qui pourront se gercer sous l'action prolongée du soleil de l'été; c'est du moins ce que semblent indiquer les essais qui ont été déjà faits pour remplacer les panneaux en tôle par des panneaux en acajou, lesquels se sont fendus à la longue, malgré la couche de peinture dont ils étaient recouverts. L'aspect de ces voitures est d'ailleurs peu flatteur à l'œil.

On continue à faire en Angleterre un assez grand usage du *papier mâché* pour les panneaux de voitures de voyageurs et le doublage intérieur des caisses. Pour les wagons à marchandises construits en bois de chêne, on se contente souvent d'une peinture à l'huile bouillante; ce système est évidemment préférable à l'emploi de la peinture ordinaire.

Les châssis à vitre des voitures de première classe ont subi une transformation utile; ils sont équilibrés par un contre-poids placé entre les deux panneaux inférieurs des portières; ils se manœuvrent avec une grande facilité au moyen d'une petite main placée à la traverse supérieure du châssis et restent en équilibre dans une position quelconque, sans que l'on soit obligé de recourir au système actuel de relevage, qui donne

toujours lieu à un entretien dispendieux. On a récemment perfectionné ce système de châssis en remplaçant l'un des bords de la rainure, qui guide le cadre, par une petite bague en fonte parfaitement dressée, pressée à ses deux extrémités par des ressorts et s'appliquant sur toute la longueur du châssis; on parvient ainsi à faire disparaître le bruit occasionné par la trépidation. Les châssis à contre-poids, tels qu'on les établit en Angleterre, ont l'inconvénient de laisser pénétrer la pluie entre leur bord inférieur et la traverse de la portière, lorsqu'ils sont fermés; cet inconvénient disparaît par une modification très-simple que l'on apporte au système dans une application qu'on en fait maintenant sur le chemin de fer du Nord.

Sur beaucoup de chemins on établit maintenant les plaques de garde en fer forgé; elles se composent d'un fer-à-cheval qui embrasse la boîte à graisse, et de deux jambes de force soudées chacune à l'un des bras du fer-à-cheval; la plaque de garde est fixée par trois points au châssis, par le sommet du fer-à-cheval et par l'extrémité de chacun des arcs-boutants. On prétend que les plaques de garde ainsi faites sont plus légères et plus fortes; il est permis de douter de l'exactitude de ces deux assertions; les plaques de garde en tôle que l'on construit depuis longtemps, répondent suffisamment à toutes les exigences du service et, au besoin, on pourrait même sans inconvénient sérieux diminuer leur épaisseur. J'ai remarqué dans quelques cas des plaques de garde auxquelles on a laissé dans la fabrication, à l'intérieur du fer-à-cheval, des appendices qui ont été ensuite repliés à angle droit pour servir de guides aux boîtes à graisse; cette disposition est bonne pour le cas où on ne donne aucun jeu aux boîtes à graisse dans le sens parallèle à la voie, mais il n'y a

aucun motif pour l'appliquer, lorsque les ressorts sont fixés aux châssis par des menottes qui servent à entraîner les boîtes à graisse et les essieux.

Les boîtes à graisse des wagons sont un des points sur lesquels s'est le plus exercé le génie des inventeurs; chaque chemin pour ainsi dire a sa patente; mais aucune de ces dispositions n'approche, pour la perfection, du système employé depuis deux années sur notre chemin de fer du Nord, système que l'on est parvenu à combiner de manière à empêcher l'inégalité d'usure des coussinets et à obtenir une fermeture hermétique.

On remarque en Angleterre une très-grande diversité dans le mode de construction des roues de wagons. Les roues à moyeu en fonte paraissent généralement réservées pour les wagons à marchandises; pour les voitures à voyageurs on emploie des roues à moyeu en fer forgé ou des roues en bois, composées d'un moyeu en fonte et d'un centre ou quelquefois de rayons et de jantes en bois, qu'embrasse le bandage. Je ne parle pas ici de quelques essais de roues en fonte cerclées en fer ou de roues pleines en fer forgé d'un seul morceau. Les roues en fer forgé ou en bois coûtent 10 à 26 p. 100 plus cher que les roues à moyeu en fonte, mais elles ont l'avantage d'être plus légères et plus solides; les roues en bois, à centre plein, soulèvent beaucoup moins la poussière et à ce point de vue ont un grand avantage; il paraît constant que, par leur moindre rigidité, elles favorisent la conservation des bandages. Il existe des systèmes de constructions très-variées pour ces dernières roues; je n'essayerai pas d'en donner une description détaillée, qui serait insuffisante pour guider les constructeurs dans la fabrication. Celui qui paraît réunir les plus nombreux suffrages, et qui est certainement le meilleur, est celui de M. Beattie, ingénieur

du South-Western; sur un moyeu en fonte, présentant une série d'évidements, on ajuste, en contact les uns avec les autres, des segments en bois dur, que l'on comprime dans le sens des rayons au moyen d'une série de pistons poussés par une presse hydraulique; on place sur la circonférence un bandage en fer mince à double rebord, et par-dessus et à chaud le bandage de la roue; on passe enfin des coins en bois dans les évidements du moyeu pour retenir encore les segments. On emploie pour cette fabrication des bois exotiques, durs et peu susceptibles de jouer; on admet, en général, que le bois de chêne serait peu convenable pour cette fabrication. Ces roues sont moins bruyantes que les roues en fer; elles conviendraient parfaitement pour l'application des bandages en acier ou en fer aciéré, dont l'usage se généralisera certainement pour les wagons, comme pour les machines, ainsi que j'ai déjà eu l'occasion d'en exprimer l'opinion.

L'introduction de plus en plus générale des trains à grande vitesse, en Angleterre, a nécessité un changement dans la dimension des fusées d'essieux; pour assurer la régularité du service, et pour éviter les accidents qui auraient pu résulter fréquemment de l'échauffement des boîtes à graisse, avec une circulation à très-grande vitesse, avec des parcours très-prolongés sans arrêt, il a fallu augmenter la surface flottante des fusées, c'est-à-dire leur diamètre et leur longueur. Comme il en résultait même pour le service ordinaire un avantage marqué, moins de frottement et plus de régularité, plus de sécurité et d'économie dans le service, cette modification est devenue générale. Le choix des dimensions à faire pour les fusées est évidemment une question de pratique; car, tandis que les lois du frottement indiquent qu'il y a avantage à réduire le

diamètre des fusées, l'expérience de tous les jours fait voir qu'il y a avantage, même pour la résistance due au frottement, à l'augmenter; il reste à savoir dans quelles limites cette augmentation est convenable. J'ai fait une sorte d'enquête à ce sujet, en interrogeant plusieurs ingénieurs et constructeurs sur les dimensions de fusées qu'ils considéraient comme les plus favorables pour les voitures à voyageurs et pour les wagons à marchandises, montés les uns et les autres sur quatre roues, c'est-à-dire pesant à pleine charge, les premiers 7 à 8 tonnes environ, les derniers 8 à 10 tonnes. Les chiffres qui m'ont été indiqués, en réponse à mes questions, sont consignés dans le tableau suivant, en regard des noms des établissements où ils m'ont été fournis :

NOMS DES ATELIERS.	DIMENSIONS DES FUSÉES.			
	VOITURES à voyageurs.		WAGONS à marchandises.	
	Diamètre.	Longueur.	Diamètre.	Longueur.
	m.	m.	m.	m.
Ateliers d'Ashford (South-Eastern)	0,076	0,203	»	»
— Wolwerton (London and North-Western)	0,089	0,203	0,089	0,168
— Crewe *id.*	0,076	0,203	0,076	0,127
Fabrique de wagons de M. Wright, à Birmingham	0,076	0,203	»	»
— de M. Marshall, *id.*	0,076	0,152	0,076	0,152
Ateliers de Derby (Midland)	0,076	0,152	0,076	0,152
— de York (York and North-Midland)	0,076	0,168	0,076	0,168

Dans les ateliers du chemin de fer du Nord, on adopte, pour le service de la grande vitesse et pour les nouveaux wagons à houille chargés de 10 tonnes, les dimensions suivantes :

Diamètre des fusées. . . . . . $0^m,08$
Longueur des fusées. . . . . $0^m,17$

Cette règle est conforme aux usages reçus en An-

gleterre. Avec ces dimensions, avec des boîtes à graisse d'une construction perfectionnée et avec des graisses bien fabriquées, on est arrivé aux résultats les plus satisfaisants pour empêcher les boîtes à graisse de chauffer. Il ne resterait plus pour améliorer ce détail de service, qui ne laisse pas que d'avoir son importance, qu'à peindre les boîtes à graisse en blanc au lieu de les peindre en noir, comme on le fait invariablement, afin de les empêcher de chauffer sous l'action des rayons solaires; on sait en effet avec quelle facilité les boîtes à graisse chauffent pendant l'été, principalement du côté où les convois reçoivent le soleil. Il y a longtemps déjà que j'ai proposé cet expédient auquel on ne s'est pas arrêté, parce qu'il est trop simple pour fixer l'attention; au moyen d'un léger ponçage sur une première couche de peinture et d'un vernis, on rendrait le nettoyage extérieur très-facile et on lèverait la seule objection qu'il soit possible de faire à cette disposition.

Les freins sont en général bien établis et arrêtent facilement le mouvement des roues; on ne les place que sur des wagons spéciaux, dits wagons à frein, qui reçoivent quelques bagages et quelques articles de messageries et portent les conducteurs du train; ces wagons sont lestés de manière à peser au minimum 6 à 7 tonnes et sont par suite très-efficaces. Il n'y a jamais qu'un frein à l'avant et un autre à l'arrière, ou souvent même un seul à l'arrière. Ce système est préférable à celui que l'on suit en France, où l'on proportionne avec beaucoup de soin le nombre des freins au nombre des voitures, mais sans se préoccuper de la qualité des appareils en même temps que de leur nombre. D'ailleurs l'obligation d'augmenter le nombre des freins, lorsque la charge des convois augmente, oblige à employer des conducteurs de supplément qui ne sont pas suffisamment

exercés à la manœuvre et qui ne rendent que des services équivoques. Deux wagons spéciaux lestés et pourvus de freins en bon état et bien manœuvrés, dans un convoi qui atteint la limite réglementaire de vingt-quatre voitures, rendraient certainement plus de service que quatre voitures à voyageurs ou wagons à bagages, plus ou moins vides et pourvus d'appareils imparfaits ou mal entretenus. C'est un point sur lequel il pourra être utile de reviser les règlements de police adoptés en France.

Depuis peu de temps on a essayé, sur divers chemins, des freins sabots, analogues aux sabots des diligences, qui enrayent les roues des wagons ; ils ont la forme d'un coin dont la face inférieure est plane et vient s'appuyer sur le rail, et dont la face supérieure, décrite avec un arc de cercle de même rayon que la roue, vient s'appliquer sous le bandage ; les dimensions sont calculées de telle sorte que la roue soit très-légèrement soulevée pour qu'elle ne frotte pas sur le rail sans que son boudin cesse cependant de lui servir de guide. Ces sabots sont commandés par la manivelle, qui se trouve à la main du garde-frein, et sont relevés assez haut pour qu'ils ne restent pas trop près du rail pendant la marche et pour qu'ils ne viennent pas buter contre les obstacles, qui pourraient se trouver sur la voie et qu'ils franchiraient moins facilement que les roues. Ce genre de frein, qui constitue une heureuse modification du système Laignel, donne lieu à des jugements très-d-vers ; mais il paraît constant que son emploi n'est pas susceptible de créer de nouvelles causes de danger, et il a l'avantage d'entrer immédiatement en prise et d'éviter l'usure inégale des bandages ; il serait à désirer que l'on fît en France quelques essais suivis sur l'application, aux convois ordinaires, des freins de cette na-

ture. On a pu voir depuis bien des années un frein analogue employé pour la descente des wagons sur le plan incliné du chemin de Mont-Rambert à Saint-Étienne, mais sans cette disposition qui consiste à soulever légèrement la roue pour la soustraire au frottement. Ce système a d'ailleurs été proposé depuis longtemps en France par de nombreux inventeurs; c'est donc l'application plutôt que le principe même qu'il y a lieu de prendre en considération. En employant la roue comme intermédiaire pour charger le sabot, on profite du poids de l'essieu et de ses roues sans rien changer au système de suspension ordinaire, avantage que ne présente pas le frein Laignel, qui prend son point d'appui sur le châssis, et pour lequel il faudrait supprimer la suspension élastique, si l'on voulait rendre son action très-prompte et utiliser tout le poids du véhicule. Ce frein peut d'ailleurs être appliqué sans la moindre difficulté à des voitures à quatre roues, et n'exige pas le développement d'une force musculaire considérable pour sa manœuvre.

§ 3. *Ateliers et remises de machines.*

Les ateliers de réparation des grandes lignes de chemins de fer ont été construits sur des plans réguliers, mais très-variés; ils sont en général vastes et garnis d'un outillage considérable. Presque partout on construit des machines, des wagons et des roues en même temps qu'on fait les réparations; sur plusieurs lignes les compagnies construisent elles-mêmes tout leur matériel.

La description de ces ateliers ne rentrerait pas dans le cadre de ce rapport; je rappellerai seulement que les plans des principaux d'entre eux ont été utilisés

pour la rédaction des projets d'ateliers des grandes lignes construites en France, et que par suite nos ingénieurs, en mettant à profit l'expérience acquise par leurs voisins, ont pu arriver à des distributions aussi avantageuses et quelquefois même plus commodes que celles qui ont été adoptées en Angleterre. Les ateliers des constructeurs particuliers ont été amenés à leur développement actuel par des agrandissements successifs, et on n'y retrouve plus, dans la plupart des cas, la trace d'un plan méthodique et ordonné en vue de simplifier les mouvements intérieurs des pièces, de diminuer les allées et venues des ouvriers et de faciliter la surveillance.

Pour les dépôts des machines, on fait indistinctement usage de rotondes et de remises à voies parallèles; je n'ai remarqué d'ailleurs aucune disposition nouvelle qui mérite d'être signalée.

La construction de machines-outils a reçu récemment une amélioration due au génie inventif de Whithworth, qui conserve toujours le premier rang parmi les fabricants des appareils de cette nature. Elle consiste à placer, sur les tours de tout genre, un second crochet du côté opposé au crochet ordinaire, de telle sorte que la pièce à tourner se trouve maintenue entre les deux, ce qui empêche les flexions d'axes en même temps que le travail est rendu beaucoup plus expéditif; les tours pour roues de wagons armés de quatre crochets et surveillés par un seul ouvrier donnent des résultats très-avantageux. La même disposition a été appliquée par Whithworth au tour à fileter, à la machine à fraiser, etc., etc.

On commence maintenant à employer pour les machines à planer une combinaison, dont le principe n'est d'ailleurs pas entièrement nouveau, qui permet d'ac-

célérer la marche de l'outil pendant le retour ; le porte-outil est commandé par un levier garni d'une coulisse, dans laquelle se meut un coulisseau fixé excentriquement sur un plateau mis en mouvement par la courroie ; ce coulisseau pousse l'outil lorsqu'il est dans la position la plus éloignée du centre d'oscillation du levier, et le ramène lorsqu'il en est au contraire très-voisin.

Dans l'atelier de construction de voitures de M. Marshall à Birmingham, on remarque plusieurs outils à travailler le bois d'une disposition très-ingénieuse, et entre autres un outil général qui permet, au moyen de lames de scie circulaire ou de fraises de différents diamètres et montées dans différentes positions sur l'axe, de couper verticalement, obliquement, de faire des tenons et des mortaises droites ou courbes, des moulures, etc. Pour arriver à ce résultat, on fixe l'axe de la scie en porte-à-faux sur un chariot qui peut monter et descendre entre des guides verticaux, et on commande la poulie montée sur cet axe au moyen d'une courroie (de 5 à 6 mètres), assez longue pour qu'elle fonctionne convenablement dans les différentes positions que peut prendre le chariot sur la verticale. Au moyen d'un assortiment de rondelles de différents calibres on peut donner à la lame de scie différentes positions, on peut monter deux lames qui travaillent à la fois pour tracer les tenons ou les remplacer par des fraises ; au moyen de supports plans, horizontaux, inclinés, ou courbes, on guide la pièce de manière à ne laisser mordre la scie que d'une quantité déterminée, de manière à faire des coupes obliques ou à creuser des mortaises sur des pièces de forme circulaire, comme les châssis de côté des voitures de première classe.

Je signalerai enfin un outil portatif pour planer sur place les tables de tiroir, que j'ai remarqué au dépôt de

Preston, la machine à forger les boulons de Ryder qui figurait à l'exposition, et enfin une machine à découper les manivelles d'essieux coudés, au moyen de fraises très-puissantes, employée dans l'atelier de M. Wilson, à Leeds.

Dans la plupart des grands ateliers on trouve organisée une fabrication de bandages, d'essieux ou de fer en barres au moyen des riblons; on affecte à ce travail un ou plusieurs fours à réverbères et un marteau-pilon très-pesant.

§ 4. *Frais de traction.*

Je me suis proposé dans ce paragraphe d'indiquer le montant et la décomposition des frais de traction sur les principales lignes anglaises; les renseignements qui se rapportent à cette question sont extraits des comptes rendus semestriels des compagnies. J'ai réuni dans un même tableau ceux qui correspondent à l'année 1851 ou dans quelques cas à l'année comprise entre le 1er juillet 1850 et le 30 juin 1851; ce tableau comprend tous les renseignements utiles que l'on peut extraire de ces documents, souvent fort incomplets.

Frais de traction et d'entretien du matériel, par kilomètre et par train, sur les chemins de fer anglais, en 1851.

ÉLÉMENTS DE LA DÉPENSE.	GREAT-WESTERN. (1)	LONDON and SOUTH-WESTERN. (2)	LONDON BRIGTON and SOUTH-COAST. (3)	SOUTH-EASTERN (d). (4)	EASTERN-COUNTIES. (5)	GREAT-NORTHERN (e). (6)	YORK, NEWCASTLE and BERWICK (f). (7)	YORK and NORTH-MIDLAND (g). (8)	MIDLAND (d). (9)	LANCASHIRE and YORKSHIRE (h). (10)	CALEDONIAN. (11)
	f.	f.	f.	f.	f.	f.	f.	f.	f.	f.	f.
Frais généraux du service	0 0215	0.0123	0,0093	0,0126	0.0142	0,0325	0,0042	0,0075	0,0128		
Mécaniciens et chauffeurs	0,0743	0,0954	0,1247	0,1024	0,0979	0,0653	0,0634	0 0734	0,1071	0,1106	
Nettoyeurs, chargeurs de coke	0,0297	0,1373 (b)		0,0283	0,0429	0.0339	0,0121	0,0312	0,0624		
Eau	»	»		0,0138	0,0110	0,0061	0,0169 (k)	0,0132	0,0117	0,0115	0,3463
Huile, suif, déchets de coton, matières diverses, éclairage, etc.	0,0267	0,1111 (c)	0,0389	0,0254	0,0237	0,0185	0,0239	0,0230	0,0108	0,0246	
Coke, houille et bois d'allumage	0,2176	0,1869	0,1965	0,2078	0,2079	0,1675	0.0137	0,1440	0,2278	0,1579	
Entretien et réparation des machines et tenders	0,1616 (a)	»	0,3028	0,2211	0,2149	0,1081 (i)	0,2185	0,1868	0,1909	0,1183	0,1824
TOTAUX des frais de traction	0,5314	0,8630	0,6712	0,6114	0,6125	0,4519	0,4897	0,4790	0,5930	0,4229	0,5287
							année 1851	année 1851			
Entretien et réparation des voitures et wagons	0,1669	0,1423	0,1743	0,1382	0,1814	0,0747	0,1818	0,2061	0.1067	»	0,1463
Kilomètres parcourus par les trains	3.194.777	3.304.926	2.806,905	3.457.573	4.184 000	3.073.360	5.452.278	3.118,306	7,802.914	6.562.740	3.142.651
Kilomètres parcourus par les machines	3.396.880	»	3.174.287	3.993.621	4.280.902	3.265.871	»	»	»	»	3.468.012
Coke consommé par kilomètre et par machine	9^{k},069	»	5^{k},840	7^{k},869	7^{k},383	8^{k},888	»	»	10^{k} 00	»	»
Coke consommé par kilomètre et par train	9, 668	»	7, 076	»	7, 413	»	»	9^{k},187	11, 00	»	»
Prix de la tonne de coke	24^{f},50	»	»	23^{f},00	»	17^{f},16	10^{f},95	13^{f},90	17^{f},50	»	»

(a) Y compris l'entretien des ateliers.
(b) Y compris les ouvriers des ateliers.
(c) Y compris les matières pour les réparations des machines et tenders.
(d) Année 1850-51.
(e) 2e semestre 1851, différant très-peu des 7 mois précédents.
(f) 2e semestre 1851. Pour l'année entière, la traction a coûté 0^{f},5230.
(g) 1er semestre 1851.— Pour l'année entière, la traction a coûté 0^{f},4500.
(h) Frais par kilomètre et par machine, le chemin ayant un profil très-accidenté, on fait un fréquent usage de machines de renforts.
(i) Le matériel en grande partie neuf ne donne encore lieu qu'à des frais de réparation peu élevés.
(k) Y compris le chargement du coke.

On peut admettre, ainsi que j'en ai fait approximativement le calcul, que le parcours des trains est en moyenne 1/3 pour les marchandises et 2/3 pour les voyageurs, ce qui représente une situation peu différente de celle où se trouveront bientôt nos grandes lignes.

L'examen de ce tableau donne lieu à deux observations principales : l'une est le peu d'écart qui existerait d'un chemin à l'autre si le prix du coke était uniforme ; l'autre est le prix de revient peu élevé de la traction comparativement aux chiffres que l'on est habitué à faire entrer en France dans les prévisions de dépenses d'exploitation.

Pour fixer les idées par un chiffre unique, je n'ai pas cherché à faire la moyenne arithmétique des nombres compris dans ce tableau ; j'ai fait une moyenne d'appréciation en choisissant les chiffres sur la valeur desquels il ne peut pas y avoir d'incertitude ou qui sont susceptibles d'une correction évidente. Ainsi en prenant pour la dépense d'entretien des machines le chiffre de 0f,20, j'ai admis que le prix de la traction par train sur le London, Brighton et South-Coast était élevé par la faiblesse des machines qui nécessite de fréquentes adjonctions, ce qui fait monter le parcours des machines à 20 p. 100 en sus de celui des trains, tandis que partout ailleurs il ne s'élève qu'à 5 ou 6 p. 100 environ ; j'ai doublé le prix partiel d'entretien du Great-Northern qui se sert d'un matériel en grande partie neuf.

J'ai pris, sauf une exception, le prix du kilomètre parcouru par un train, parce que c'est sous cette forme que la plupart des compagnies donnent des termes de comparaison ; elle est d'ailleurs la plus convenable, car c'est là en définitive le résultat qu'il faut connaître. Par suite la dépense des machines de réserve, de se-

cours et de renfort, et même dans beaucoup de cas celle des machines de ballast, se trouve mise à la charge du parcours des trains affectés au service des voyageurs et des marchandises.

En partant de ces données et en admettant une consommation moyenne de coke de 10 kilogrammes par kilomètre et par train, et un prix de 20 francs pour la tonne effective de combustible, j'ai composé le prix de revient type suivant :

Prix de revient moyen de la traction par kilomètre et par train

	fr.
Frais généraux de service	0,015
Mécaniciens et chauffeurs	0,090
Personnel des dépôts	0,030
Eau d'alimentation et de lavage	0,015
Huile, suif, déchets, éclairage et matières diverses	0,025
Coke, houille et bois d'allumage	0,200
Entretien et réparation des machines	0,200
Total	0,575

Ce chiffre peut être regardé comme représentant la situation actuelle des chemins anglais; mais comme chaque semestre réalise encore des économies sur le semestre précédent, on peut admettre que ce prix tombera très-prochainement à 0f,55 et peut-être même dans quelques années à 0f,50.

Il est facile, en examinant les éléments qui le composent, de se rendre compte des causes qui ont amené ce prix de revient à un taux aussi bas. En première ligne on doit remarquer que le coke, presque toujours d'excellente qualité, est à un prix très-peu élevé, qui a toujours été en diminuant et qui varie maintenant de 10 à 25 francs par tonne, tandis que sur les grandes lignes françaises, rendu au lieu de consommation, il revient à des prix variant de 25 à 50 francs. La consommation, comme partout, s'est considérablement

réduite sous l'influence des améliorations apportées à la construction des machines et de l'expérience de jour en jour plus grande acquise dans leur emploi. Le bas prix du combustible et en même temps des métaux rend également la réparation moins coûteuse qu'en France ; la qualité même de certains pièces et spécialement des bandages, qui sont depuis longtemps fabriqués avec une perfection que nous dépasserons peut-être, grâce à la bonne qualité des minerais que renferme notre sol, mais que nous n'atteignons que depuis fort peu de temps, ajoute à l'économie des réparations; en outre l'expérience a conduit à augmenter la force de toutes les pièces exposées à des ruptures, à augmenter les surfaces de frottement, à augmenter le diamètre des roues, à mettre en un mot les appareils dans les conditions de service les plus favorables.

Pour l'ensemble du service, les dépenses de main-d'œuvre sont également moindres qu'elles ne le sont généralement en France; les machines font de longs parcours avec d'autant plus de facilité que le coke est pur et que le feu conserve toute son activité lorsqu'on a soin de le piquer légèrement de temps en temps, et que les machines ayant tous leurs organes pourvus de larges surfaces de frottement sont moins exposées à ce que leurs pièces s'échauffent, grippent et occasionnent des retards. En outre, les chemins de fer étant très-nombreux et exploités depuis très-longtemps, les ouvriers spéciaux, auxquels il fallait attribuer à l'origine des salaires très-élevés, se sont multipliés et sont traités sur un pied d'égalité ou de proportionnalité équitable comparativement aux ouvriers des autres professions; il en résulte que le prix de la main-d'œuvre sur les chemins de fer est moins élevé qu'on ne s'attendait à le trouver en Angleterre. Je reproduis ici un renseigne-

ment qui s'applique à la vérité à une des lignes les plus éloignées de Londres et des districts manufacturiers, mais qui par cela même offre peut-être un meilleur terme de comparaison avec la plupart des lignes françaises; c'est l'état du nombre des ouvriers de diverses professions employés dans le service des ateliers et de la traction du chemin de fer calédonien et des sommes qui leur ont été payées dans le cours d'une année finissant au 31 juillet 1851.

DÉSIGNATION DES PROFESSIONS.	Nombre.	SOMME payée dans l'année.	
		totale.	moyenne par tête.
		fr.	fr.
Mécaniciens, chauffeurs, etc.	210	355.250	1.691
Ouvriers mécaniciens, aides, etc.	347	404.100	1.165
Nettoyeurs, hommes du coke, etc.	119	108.275	910
Ouvriers carrossiers, nettoyeurs de voitures.	273	303.900	1.110
Manœuvres.	12	10.650	887
Contre-maîtres et chefs du dépôt, gardes-magasins, etc.	15	44.725	2.981
Chefs du service et employés de bureau.	»	22.251	»

Enfin, avec un personnel choisi, familiarisé de longue main avec toutes les nécessités du service, on a pu réduire d'une manière très-notable les frais d'état-major.

Ces progrès n'ont pas été réalisés tout d'un coup; ils ont éte le fruit du temps et de l'expérience; j'aurais voulu, pour en constater la marche, établir pour diverses époques un tableau semblable à celui qui précède, afin de faire ressortir la décroissance du prix de revient de la traction; mais ce n'est que depuis peu de temps que les compagnies anglaises font connaître le parcours des trains, et je n'ai pu recueillir que quelques chiffres qui, pour être isolés, n'en sont pas poins instructifs. Ces résultats, qui appartiennent au Great-Western, sont les suivants:

Prix de revient de la traction par kilomètre et par train.

	fr.
2ᵉ semestre 1841.	1,080
2ᵉ semestre 1845.	0,796
2ᵉ semestre 1850.	0,594
2ᵉ semestre 1851.	0,525

Le prix des matières premières tend plutôt à rester stationnaire qu'à décroître d'une manière notable, le prix de la main-d'œuvre s'élèvera plutôt qu'il ne s'abaissera, les dépenses d'entretien s'aggraveront dans quelques cas; par suite, on doit prévoir que si quelques améliorations sont encore possibles pour le chiffre de la consommation, le prix de revient approche de sa limite, comme une branche d'hyperbole de son asymptote; on ne risque donc pas de se tromper sensiblement en fixant cette limite pour l'ensemble des chemins de fer anglais à 0f,50.

L'exemple de l'Angleterre est conforme à ce que l'expérience permet de constater en France; depuis quelques années on voit le prix de revient de la traction diminuer d'une manière très-marquée; cet exemple peut servir sinon à fixer la limite que ce prix de revient tend à atteindre, du moins à la resserrer entre des chiffres assez rapprochés. On peut admettre que les frais généraux, les frais de personnel, de conduite et des dépôts, les consommations de matières diverses peuvent être maintenus ou ramenés au même taux en France qu'en Angleterre; la différence doit donc porter à peu près exclusivement sur le prix du combustible, et sur le prix des réparations; lequel se compose en grande partie de houille pour la forge et les machines motrices, de fer marchand, de bandages, de fonte moulée, etc., matières qui toutes ont un prix beaucoup moins élevé en Angleterre qu'en France. Si l'on admet que, par suite de cette dernière cause, le prix

kilométrique des réparations de machines et de tenders soit de 50 p. 100 supérieur aux prix anglais, si l'on admet une consommation moyenne de coke de 10 kilogrammes, on pourra représenter le prix de la traction sur une quelconque de nos grandes lignes (les chiffres que j'ai reproduits ne s'appliquent qu'à des chemins d'un grand développement) par l'expression :

$$P = 0^f,475 + \frac{F}{100},$$

F étant le prix de la tonne, en francs, rendue aux lieux de consommation. Le terme constant $0^f,475$ est obtenu en retranchant du prix moyen de la consommation actuelle en Angleterre la dépense du coke et en y ajoutant 50 p. 100 de la dépense d'entretien. Pour les prix de 30 francs et de 50 francs pour la tonne de coke, on aurait des prix de revient de $0^f,775$ et de $0^f,975$. On se rapproche, en effet, peu à peu de ces prix, et il y a tout lieu de supposer que ce ne sera pas là une limite extrême ; dans les deux cas que j'ai supposés, les ingénieurs chargés du service de la traction sur nos lignes principales, peuvent raisonnablement poser comme but de leurs efforts des prix de $0^f,75$ et de $0^f,90$, surtout maintenant que tout se simplifie par la réunion en une seule administration des chemins qui sont dans une dépendance réciproque.

J'ai supposé pour arriver aux appréciations qui précèdent une consommation de 10 kilogrammes par kilomètre et par train ; on peut certainement dans beaucoup de cas descendre au-dessous ; mais on n'arrive à des économies très-considérables qu'au moyen de primes très-fortes allouées aux mécaniciens, et on transforme en partie ces économies en supplément de dépense sur l'article du personnel ; d'ailleurs l'augmentation de vitesse des trains de voyageurs et de charge des trains

de marcandises, pourra diminuer un peu ces économies par la suite. Dans tous les cas, une erreur d'appréciation sur ce point n'aurait d'autre résultat que d'atténuer les chiffres que j'ai admis et de justifier la supposition de réductions ultérieures.

Lorsque j'ai eu à traiter cette question dans différentes circonstances, j'ai admis des prix de revient bien supérieurs à ceux que j'indique actuellement; à cette époque, on ne prévoyait pas encore les progrès considérables qui ont eu lieu partout depuis deux années, et surtout pendant l'année 1851; je crois d'ailleurs que la situation des chemins de fer anglais', au point de vue de la traction, n'avait jamais été aussi complétement éclaircie que j'ai pu le faire en dépouillant les comptes rendus des compagnies, et ne fournissait pas encore un terme de comparaison certain; on parlait bien de prix très-peu élevés, mais sans savoir exactement s'ils comprenaient bien tous les éléments de dépense réelle. En rassemblant tous ces résultats numériques, je me suis appliqué à n'en laisser aucun en dehors, et particulièrement le renouvellement que quelques compagnies assurent au moyen d'un prélèvement spécial sur les recettes.

Je ne chercherai pas à faire de rapprochements entre les résultats de l'exploitation des chemins anglais et ceux de nos chemins; au moment où j'écris ces lignes, je n'ai pas encore sous la main les comptes officiels des compagnies pour 1851. Ce rapprochement pourra d'ailleurs être fait facilement pas tous ceux qu'il intéressera; je ne me flatte pas de voir les chiffres que j'ai formulés exempts de toute contestation, mais je crois qu'on y trouvera au moins d'utiles indications sur la direction dans laquelle des améliorations doivent être tentées et peuvent être espérées.

Dans le tableau de la page 575, j'ai indiqué le prix par kilomètre et par train de l'entretien et de la réparation des voitures ; ce prix qui, en général, ne comprend pas le graissage et le nettoyage, varie de $0^f,15$ à $0^f,20$. Il est peu élevé, parce que les matières de réparation sont peu coûteuses, et surtout parce que les bandages sont de bonne qualité, ce qui n'a pas lieu encore d'une manière complète sur nos lignes ; d'ailleurs, parmi les voitures de voyageurs, il n'y a que celles de première classe qui soient garnies, et cela de la manière la plus simple et la plus économique. Cet élément de dépense comme celui de la traction est certainement destiné à se réduire encore en France, où il ne paraît pas, en général, être arrivé à la dernière limite d'économie.

J'ai déjà eu l'occasion de dire que la question d'un fonds spécial pour le renouvellement du matériel ne trouvait pas en Angleterre autant de partisans que celle qui concerne la voie de fer. Lorsqu'il y aura des machines ou des voitures à réformer, parce que la réparation en sera devenue plus onéreuse que le remplacement, chaque année pourra fournir, en déduction du produit net, la somme nécessaire pour faire les achats. Il serait fort difficile d'assurer une limite à la durée d'un matériel de cette nature ; cette durée sera essentiellement variable avec le point auquel seront dirigées les affaires de chaque compagnie ; mais il semble qu'en général, à moins que les formes des véhicules ou la dimension des machines ne cessent d'être en rapport avec les besoins du trafic, on doit arriver par des réparations importantes, par des reconstructions partielles, successivement répétées, à maintenir indéfiniment le matériel roulant en bon état de service ; dans tous les cas, il paraît certain, d'après l'exemple même des chemins établis depuis longtemps, que pendant un laps de temps

de vingt à vingt-cinq années, un matériel, surtout celui que l'on a construit depuis quelques années avec plus de solidité que par le passé, pourra être maintenu en état de service, et cela par l'entretien courant dans lequel doivent être comprises, bien entendu, les dépenses de toute nature auxquelles donne lieu ce matériel, sans que par suite on ait à sortir des limites fixées plus haut pour le prix de la traction.

La question du prix de revient de la traction soulève nécessairement celle des entreprises à forfait. On a généralement renoncé en Angleterre à ce système, commode pour l'administration des compagnies, mais dont l'adoption, à une époque où l'art de la locomotion était loin d'avoir dit son dernier mot, pouvait donner lieu à de graves mécomptes.

Je ne connais en Angleterre qu'un chemin d'une importance un peu considérable, celui du North-Staffordshire, qui ait un entrepreneur pour la traction et l'entretien du matériel. Cet entrepreneur est M. Wright fils, constructeur de wagons à Birmingham; les clauses du traité sont les mêmes que celles du traité de M. Buddicom avec la compagnie de Rouen; l'entrepreneur doit, après l'expiration de son traité dont la durée est fixée à dix ans, rendre le matériel dans l'état où il l'a pris, et il subit une retenue pour garantir la dépréciation qu'il peut être dans le cas de payer; cette retenue est d'environ $0^f,10$ par kilomètre et par train pour les machines.

Pour l'année 1850-51 le prix total payé par la compagnie du Northd-Stafforshire, pour la traction et l'entretien du matériel roulant a été, par kilomètre

et par train.	$0^f,841$
ou, déduction faite du loyer des ateliers montant à	$0^f,095$
égale à.	$0^f,746$

Si l'on remarque que ce prix comprend $0^f,15$ à $0^f,20$ pour l'entretien des véhicules, la retenue pour dépréciation étant en dehors, on reconnaîtra qu'il rentre dans les prix constatés pour les services en régie. Pour l'année 1851, il se trouve réduit d'ailleurs à $0^f,691$, ce qui fait ressortir la traction seule à 0,50 ou $0^f,55$.

La compagnie avait mis cette entreprise en adjudication, et M. Wright l'a emporté sur treize concurrents.

Ce résultat semble être de nature à rendre quelque faveur aux entreprises de traction à forfait, dont le principal avantage est de simplifier notablement l'administration des compagnies. Elles sont plus faciles à réaliser maintenant qu'il y a quelques années, car chaque exercice a fait faire un pas vers la limite à laquelle les frais de traction pourront rester pendant longtemps, limite que pour chaque chemin on peut dès à présent prévoir avec quelque précision.

RECHERCHES CHIMIQUES

sur

UN NOUVEL OXYDE EXTRAIT D'UN MINÉRAL TROUVÉ EN NORWÉGE.

(Examen et analyse de l'orangite.)

Par M. A. DAMOUR (1).

M. le professeur Bergemann a publié dans les *Annales de Poggendorff*, t. LXXXII, p. 561, l'analyse d'un minéral récemment trouvé à Langesundfiord, près Brewig en Norwége, et désigné sous le nom d'*orangite*. Il a cru reconnaître dans ce minéral la présence d'un métal nouveau formant, à l'état d'oxyde, une combinaison avec de la silice et de l'eau. Il a donné à ce métal le nom de *donarium* et a trouvé son poids atomique égal à 997,4 : le poids atomique de l'oxyde de donarium, ou *donarine*, ayant pour formule Dr^2O^2 s'élèverait, suivant le même auteur, à 2294,8.

La description des caractères du donarium, des propriétés de son oxyde et des sels auxquels ce dernier donne naissance, par sa combinaison avec les acides, m'ayant inspiré des doutes sur la nature de ce nouveau corps simple, j'ai pensé qu'il y avait lieu de le soumettre à un examen attentif et de reprendre l'analyse quantitative de la substance minérale qui le renferme.

Les échantillons d'orangite que j'ai dû réunir pour cet objet m'ont été fournis par M. Krantz, naturaliste à

(1) Ce travail a été présenté à l'Académie des sciences, dans sa séance du 3 mai 1852.

Bonn (Prusse). La couleur de ce minéral est le jaune orangé : il présente, dans sa cassure récente, l'éclat du grenat résinite de Norwége connu sous le nom de colophonite. Sa densité est supérieure à celle de tous les silicates connus : M. Bergemann l'a trouvée égale à 5,39 ; dans mes expériences, j'ai obtenu un nombre un peu moins élevé : 5,19.

Je n'ai pu l'observer encore qu'en petites masses amorphes, fendillées dans plusieurs sens et par cela même faciles à briser : sur certains points cependant, les échantillons montrent une structure compacte, à cassure résineuse. Il raye faiblement le verre. Chauffé dans le tube ouvert, il perd sa transparence, prend une teinte plus pâle, décrépite quelquefois, et laisse dégager de l'eau neutre. Réduit en fragments grossiers et chauffé dans un creuset de platine enveloppé de deux autres creusets de même métal munis de leurs couvercles, il perd son eau de combinaison et acquiert une teinte plus foncée tirant sur le brun. A la flamme du chalumeau, il se décolore et reste infusible. Fondu avec le sel de phosphore, il se dissout et donne un verre qui reste limpide et incolore tant qu'il est chaud, et qui devient laiteux et coloré en vert pâle après son refroidissement. Fondu avec le borax, il donne un verre jaune orangé à chaud, qui perd sa transparence et ressemble à un émail blanc grisâtre lorsqu'il est refroidi ; si l'on ajoute un peu de nitre à la matière en fusion, elle prend une teinte jaune orangé qui persiste après le refroidissement.

L'acide chlorhydrique attaque facilement le minéral lorsqu'il est réduit en poudre fine, et le convertit en gelée.

Après avoir été calcinée, l'orangite n'est plus attaquable par l'acide chlorhydrique; mais l'acide sulfu-

rique, aidé par l'action de la chaleur, la décompose complétement.

Dans plusieurs essais préliminaires je me suis attaché à isoler les différentes matières qui constituent l'orangite. L'examen des caractères de chacune d'elles m'a amené à reconnaître que cette substance est essentiellement composée de silice, de thorine et d'eau ; qu'elle contient en outre, mais dans une faible proportion, des oxydes de plomb, d'urane, de fer et de manganèse, de la chaux, de l'alumine, de la magnésie, de la potasse et de la soude. La thorine que j'ai extraite m'a présenté, avec une entière exactitude, les propriétés que M. Berzélius, dans son Traité de chimie, assigne à cette terre; et j'ai ainsi acquis la conviction que l'oxyde de donarium annoncé par M. Bergemann n'était autre que de la thorine impure. D'après la description que M. Bergemann donne des propriétés de la donarine, on remarque en effet une presque identité de caractères entre cet oxyde et la thorine. Ainsi tous deux, après avoir été calcinés, cessent d'être solubles dans les acides chlorhydrique et azotique et ne se dissolvent que par suite d'une longue digestion dans l'acide sulfurique chauffé. Tous deux sont également précipités, à l'état gélatineux, de leurs dissolutions acides par la potasse, la soude, l'ammoniaque, et sont insolubles dans un excès du réactif. Ils se dissolvent également bien dans les carbonates alcalins; ils sont également précipités de leurs dissolutions acides par l'acide oxalique. Leurs sulfates dissous dans l'eau ont cette remarquable propriété de donner, par l'effet de l'ébullition dans une capsule de platine, un précipité floconneux, blanchâtre, qui se redissout lorsque la liqueur est refroidie.

Les seules différences importantes que M. Bergemann ait signalées entre ces deux substances seraient donc :

1° La faible densité de la donarine comparée à celle de la thorine ; il a trouvé que la densité de la première était égale à 5,576, tandis que celle de la thorine déterminée par M. Berzélius est de 9,402 ;

2° La couleur rouge que prend la donarine lorsqu'elle a été calcinée.

Sur ces deux points mes expériences sont en désaccord avec celles de M. Bergemann. Ayant déterminé avec beaucoup de précautions la densité de la matière terreuse extraite de l'orangite, j'ai obtenu le nombre 9,366, qui se rapproche notablement de celui de 9,402 que M. Berzélius assigne à la thorine.

Quant à la différence de couleur que signale M. Bergemann, elle s'explique tout naturellement par la présence des oxydes de plomb et d'urane qui, par suite du procédé d'analyse que ce chimiste a adopté, ont dû rester mélangés à la terre extraite par lui de l'orangite. En prenant les précautions que j'indiquerai plus loin, cette terre s'obtient parfaitement blanche et ne me paraît différer en rien de la thorine.

Je vais maintenant décrire la méthode employée dans mon analyse.

Le minéral, réduit en poudre très-fine et desséché à la température de + 70° centigrades, a été attaqué par l'acide chlorhydrique qui a produit une faible effervescence due à un dégagement de quelques bulles d'acide carbonique et probablement aussi d'un peu de chlore, et l'a converti en gelée. La liqueur acide a été évaporée à siccité ; la masse sèche humectée d'acide chlorhydrique et reprise par l'eau a laissé déposer de

la silice qu'on a recueillie sur un filtre. Cette silice, suffisamment lavée, séchée et pesée, a été traitée par une lessive de carbonate de soude et s'est dissoute en totalité.

La liqueur séparée de la silice a été traitée par l'hydrogène sulfuré, qui y a fait naître un dépôt de sulfure de plomb. Ce dépôt a été recueilli, puis converti en sulfate plombique dont le poids a servi à déterminer la proportion d'oxyde plombique contenue dans la matière employée.

La liqueur séparée du sulfure plombique a été chauffée pour chasser l'hydrogène sulfuré, puis traitée par l'acide oxalique. La liqueur étant acide, il s'est immédiatement formé un abondant précipité blanc d'oxalate thorique qu'on a recueilli sur un filtre et lavé avec de l'eau froide renfermant un peu d'acide oxalique (A).

On a traité par l'ammoniaque et le sulfhydrate ammonique la liqueur séparée de l'oxalate thorique; il s'y est formé un précipité floconneux, gris noirâtre peu abondant (B).

La liqueur sulfureuse séparée de ce précipité a été évaporée à siccité. On a chassé les sels ammoniques par la calcination : il est resté un résidu brun olivâtre qu'on a traité par l'eau chaude. Une portion du résidu s'est dissoute; la portion insoluble a été recueillie sur un filtre : elle était formée d'oxyde d'urane qu'on a redissous dans l'acide azotique et précipité par l'ammoniaque. La liqueur contenant les matières solubles a été traitée par l'oxalate d'ammoniaque, qui a fait naître un faible précipité d'oxalate calcique. On a évaporé à siccité la liqueur séparée de l'oxalate et chauffé le résidu jusqu'au rouge. Ce résidu consistait en chlorures

de sodium et de potassium qu'on a pesés et séparés ensuite l'un de l'autre au moyen du chlorure platinique.

Le précipité (B) a été dissous dans l'acide chlorhydrique, la liqueur évaporée à siccité, reprise par l'eau et filtrée. Il s'est séparé un très-faible résidu de silice. La liqueur chlorhydrique a été sursaturée par du carbonate de potasse qui y a fait naître un précipité jaunâtre. Ce précipité, traité par la potasse caustique, a laissé dissoudre quelques traces d'alumine. La partie insoluble renfermait des carbonates de chaux, de fer et de manganèse. On a séparé ces oxydes par les moyens ordinaires.

On a repris le précipité (A) d'oxalate thorique pour le dissoudre, encore humide, dans le carbonate ammoniacal. Il n'est resté sur le filtre qu'un faible dépôt brunâtre contenant un peu de carbonate de chaux manganésifère et quelques traces de silice.

La liqueur ammoniacale tenant l'oxalate thorique en dissolution a été traitée par le sulfhydrate ammonique qui a coloré immédiatement la liqueur en brun. Après un repos de vingt-quatre heures, cette liqueur était devenue parfaitement claire; un faible précipité noir s'était rassemblé au fond du vase. Ce précipité, séparé par la filtration, consistait en sulfure de plomb mêlé de sulfure de fer.

La liqueur ammoniacale sulfureuse ainsi séparée des sulfures de plomb et de fer a été chauffée dans un matras pour chasser le carbonate et le sulfhydrate ammoniques. L'ébullition a fait précipiter une partie de la thorine : on n'a obtenu la précipitation complète de cette terre qu'en sursaturant la liqueur par l'ammoniaque caustique. Ce précipité a été lavé, puis séché et fortement calciné.

L'eau a été dosée à part, à deux reprises différentes, sur des quantités de matière pesant 0g,8700 et 1g,0265.

Dans la première expérience, le minéral a été réduit en poudre fine et séché à + 70° centigrades. On l'a fait rougir fortement dans un creuset de platine : la perte qu'il a subie s'est élevée à 0g,0634 pour un gramme.

Craignant que la vapeur d'eau dégagée du minéral par l'action de la chaleur n'eût entraîné une certaine quantité de la matière pulvérulente, j'ai, dans une seconde expérience, placé le minéral réduit en fragments très-petits au fond d'un creuset de platine enveloppé de deux autres creusets de même métal et tous trois fermés de leurs couvercles. J'ai fait chauffer le tout avec précaution et progressivement jusqu'au rouge vif à la flamme d'un éolipyle à alcool. La perte s'est élevée à 0g,0614 pour 1 gramme.

En résumé, l'analyse que j'ai faite de l'orangite a donné les résultats suivants ;

	gr.	oxygène.		rapports.
Silice	0,1752		0,0910	3
Thorine	0,7165	0,0848		
Chaux	0,0159	0,0045	0,0899	3
Oxyde plombique	0,0088	0,0006		
Oxyde uranique	0,0113			
Oxyde manganique	0,0028			
Oxyde ferrique	0,0031			
Magnésie	traces,			
Alumine	0,0017			
Potasse	0,0014			
Soude	0,0033			
Eau et traces d'acide carbonique	0,0614		0,0546	2
	1,0014			

M. Bergemann a trouvé :

Silice.	0,17695
Oxyde de donarium.	0,71247
Carbonate de chaux.	0,04042
Oxyde ferrique.	0,00310
Oxyde de manganèse et magnésie.	0,00214
Potasse et soude.	0,00303
Eau.	0,06900
	1,00711

On voit que, dans l'analyse de M. Bergemann, il n'est question ni de l'oxyde plombique ni de l'oxyde uranique : ces oxydes seront probablement restés mélangés à la substance portée sous le nom d'oxyde de donarium et auront modifié ses caractères naturels.

Si dans mon analyse on considère la chaux et l'oxyde plombique comme s'étant substitués à une faible quantité de thorine, il en résulte que l'oxygène de ces bases réunies, l'oxygène de la silice et l'oxygène de l'eau montrent le rapport approché de 3 : 3 : 2. Ce rapport est représenté par la formule



$$\dot{T}h^{3}\dddot{Si} + 2\dot{\dot{H}}.$$

L'alumine, la potasse et la soude n'apparaissent ici qu'en proportions très-minimes aussi bien que les oxydes de fer et de manganèse : ces derniers me paraissent jouer le rôle de matières colorantes accidentelles.

Il est à propos de mettre en regard de ces résultats l'analyse de M. Berzélius sur la thorite :

	gr.
Silice.	0,1898
Thorine.	0,5791
Chaux.	0,0258
Oxyde plombique. . . .	0,0080
Oxyde d'urane.	0,0161
Oxyde manganique. .	0,0239
Oxyde ferrique.	0,0340
A reporter.	0,8767

Report.	0,8767
Alumine.	0,0006
Potasse.	0,0014
Soude.	0,0010
Magnésie.	0,0036
Oxyde d'étain.	0,0001
Eau.	0,0950
Résidu inattaqué. . . .	0,0170
	0,9954

M. Berzélius admet que la thorite est un composé formé de divers silicates hydratés et principalement d'un silicate de thorine ayant pour formule :



Or si l'on calcule la composition de la thorite d'après cette dernière formule, on trouve les nombres suivants :

		En 0.1000
1 équivalent de silice. . .	577.478	0,1674
3 équivalents de thorine.	2534.700	0,7348
3 équivalents d'eau. . . .	337,440	0,0978
	3449.618	1,0000

La composition que M. Berzélius assigne à la thorite, considérée comme espèce définie, est loin d'être d'accord avec les résultats de son analyse ; mais il est digne de remarque que cette composition théorique se trouve à peu près vérifiée dans l'analyse de l'orangite. Bien que M. Bergemann et moi nous ayons trouvé dans cette dernière substance une proportion d'eau inférieure à celle que M. Berzélius a constatée dans la thorite, je n'en suis pas moins porté à croire que ces minéraux doivent être compris sous une même formule et constituent un seul hydrosilicate de thorine qui renferme diverses matières accidentellement mélangées en plus ou moins grande quantité. Ces mélanges me paraissent

d'autant plus probables dans ces minéraux, que j'ai vu des échantillons d'orangite passant de la nuance jaune orangé clair au brun foncé particulier à la thorite déjà connue. Il me paraît donc convenable de réunir ces matières minérales en supprimant le nom d'*orangite* et leur conservant celui de thorite donné par M. Berzélius.

De ce qui précède, je suis également amené à conclure que la donarine et la thorine sont identiques, et que par conséquent le donarium doit être rayé de la liste des corps simples.

BULLETIN.

Sur les richesses minérales de la Californie.

La production de l'or, déjà si considérable, paraît destinée à s'accroître encore. Une chaîne de montagnes traverse en serpentant toute l'étendue du continent depuis la frontière de l'Orégon jusqu'au fond de la mer Vermeille. Ces montagnes renferment partout des gisements de quartz aurifère à quelques pieds au-dessous de la surface. Suivant des renseignements dignes de foi, ces couches, qui s'exploitent déjà sur un grand nombre de points, ont une richesse moyenne de 20 sous la livre ($0^k,373$). C'est évidemment à cette source, soumise depuis des siècles à une espèce d'exploitation naturelle par suite des pluies, des neiges et d'autres causes, que l'état actuel de la science nous permet de conjecturer que l'or alluvial des bassins du Sacramento et du San Joachim doit son origine.

Les machines dont on se sert pour broyer le quartz et qu'on a fait venir des États-Unis à grands frais, sont toutes trop faibles de puissance. Les compagnies qui se sont organisées dans ce but n'ont généralement que peu de ressources. Cependant les capitaux commencent à s'offrir et les procédés à se perfectionner. Encore huit à dix mois, et l'exploitation par machines aura remplacé le travail individuel ou à bras.

Le produit qui vient immédiatement après l'or en importance, c'est le mercure. Il n'y a peut-être pas de pays au monde où les gisements de ce dernier métal se rencontrent aussi souvent. Sur plusieurs points on les exploite avec beaucoup de succès. Les mines de mercure de la Nouvelle-Almaden, situées près de San José, capitale de la Californie, donnent lieu à une extraction qui ne le cède en activité qu'à celle de l'entreprise dont elles ont emprunté le nom. Une compagnie d'Anglais, d'Américains et de Mexicains s'est organisée en 1845 avec un capital de 2.500.000 francs pour exploiter ces riches minerais qu'on venait alors de découvrir. Des appareils ont été ap-

portés d'Angleterre à grands frais, et des ateliers montés sur le plan le plus perfectionné. L'entreprise de la Nouvelle-Almaden a aujourd'hui une puissance productive de 10.000 quintaux par an, et atteint souvent jusqu'à 6.000 livres de mercure par jour. Le minerai a un rendement moyen de 50 p. 100. C'est presque le quintuple du minerai de la Nouvelle-Almaden en Espagne.

Déjà la Californie commence à exporter du mercure. Les débouchés principaux sont le Chili, le Pérou et le Mexique. Le prix de ce produit varie à San Francisco de 3f,15 à 5 fr. la livre américaine de 12 onces. La Californie n'a pas de concurrence à craindre sous le rapport de ce genre d'extraction, pas plus que sous celui de l'extraction de l'or.

L'argent paraît abonder un peu moins que le mercure, du moins n'en a-t-on pas encore découvert de gisements considérables. Çà et là pourtant on trouve des traces et même des veines assez riches. Une de ces dernières, située près de Monterey, donne lieu en ce moment à une exploitation active, mais dont les résultats doivent être peu féconds, puisqu'on en parle à peine à San Francisco. Le platine se rencontre presque partout mêlé à l'or. En séparant au moyen du mercure ce dernier produit du fer qui l'accompagne, on trouve au fond des appareils ou une poudre impalpable, ou de petites boules argentées sur lesquelles le mercure n'a pas de prise. Cette poudre, ces boules, c'est du platine qu'on jette pour le moment sans chercher à en tirer parti. Les sables aurifères du *Gold Bluffs*, nouveau placer découvert depuis peu, renferment une quantité considérable de platine mêlé au fer magnétique.

Pour que rien ne manquât à la richesse minérale de ce pays favorisé, on vient de trouver près de Benicia, au fond même de la baie de San Francisco, une couche de charbon de l'espèce dite *cannel coal*. Cette découverte, qui cause une grande sensation sur les lieux, aura pour effet, si elle se confirme, d'avancer de trois siècles la grandeur de cet État, en le plaçant sur une base plus stable, plus régulière et moins démoralisante que l'or et les autres métaux précieux.

(*Extrait d'une lettre de* M. Dillon, *consul général de France en Californie, à M. le ministre des affaires étrangères.* 28 *août* 1851.)

Sur les mines de soufre de la haute Égypte.

Une soufrière très-abondante a été découverte, en 1850, à Bahar el Saphingue, au bord de la mer Rouge, et concédée à l'inventeur, le sieur Terranova, par le gouvernement égyptien.

Une concession de dix années est faite audit sieur Terranova pour l'exploitation, en société avec le gouvernement, de deux montagnes soufrières; de telle sorte que l'associé et l'administration égyptienne supporteront par moitié les frais de l'entreprise et jouiront également par moitié des produits.

D'après la déclaration du concessionnaire et de M. Wilkinson, son associé, les travaux, poussés depuis ledit mois de juillet jusqu'à la fin de 1851, donneront un produit de 12.500 quintaux métriques. On espère pour l'année prochaine la quantité de 25.000 quintaux.

Le minerai rend 45 p. 100 de soufre purifié et bon à livrer.

Le quintal de soufre tout fabriqué ne revient pas à plus de 10 piastres, soit 2f,50, vu le bas prix de la main-d'œuvre. L'expérience en a été faite.

Le transport de la marchandise de la mine à Kèneh, cinq journées de désert, s'opère à dos de chameau sur le pied de 25 piastres, soit 6f,25 pour 2 quintaux, charge ordinaire d'un chameau.

De Kêneh à Alexandrie, par le Nil, 0f,50 le quintal.

Frais de magasinage et de douane, 0f,74 le quintal.

Ainsi le soufre égyptien rendu à Alexandrie, lieu d'embarquement pour l'Europe, ne reviendra pas à la compagnie à plus de 7 francs le quintal.

Le prix de vente sera fixé par les entrepreneurs suivant leur convenance et d'après les offres qui leur seront faites : aucune limite ne leur est imposée à cet égard.

Le commerce devra s'adresser au gouvernement égyptien pour la moitié appartenant à celui-ci, et à la compagnie Terranova, Wilkinson, etc., pour la part qui revient à cette dernière et dont elle disposera en toute liberté.

Il est à remarquer cependant que le soufre d'Égypte ne donnera pas matière à une exportation en Europe cette année, par la raison que, sur les 12.500 quintaux présumés, 5 à

6.000 resteront dans le pays, où 1.500 seront employés pour les besoins de l'administration de la guerre et que le reste passera dans le Hedjaz, qui jusqu'à présent a tiré annuellement d'Europe de 6 à 7.000 quintaux; pour la fabrication de la poudre.

Les produits de la mine trouveront dans cette contrée un débouché infaillible et prompt pour la quantité qui s'y consomme chaque année, car la facilité et le bon marché des transports par les barques de la mer Rouge amèneront une grande baisse dans la valeur du soufre au Hedjaz; en même temps que le prix de la vente sur place donnera un très-beau bénéfice à la société.

Mais l'année prochaine 12.000 quintaux au moins descendront à Alexandrie pour l'exportation, la consommation de l'Égypte et du Hedjaz étant réservée; et cette quantité ne fera, suivant toute apparence, que s'accroître d'année en année au grand préjudice des soufres de Sicile.

(*Extrait d'un rapport de* M. DELAPORTE, *consul de France au Caire.* 16 *juin* 1851.)

Sur les mines d'or découvertes à Carupano, province de Cumana (république du Vénézuéla).

Des travaux récents ont fait reconnaître l'existence de mines d'or dans la province de Cumana, aux environs de Carupano, port près du golfe de Paria et de l'île anglaise de Trinidad.

Les mines nouvellement découvertes sont situées près d'un village nommé Cariaquito, entre les bourgs de Carupano et de San José, où se trouve un port de seconde classe. Ces deux bourgs sont à la distance de trois lieues l'un de l'autre, et cet espace est peuplé et planté de cannes à sucre.

Carupano est le canton le mieux cultivé de la province de Cumana. Il est habité par un grand nombre de Français dont la plupart appartiennent au département de la Corse. Sa situation géographique est très-avantageuse. Son climat n'est pas malsain comme celui de l'Yurario dans la Guyane vénézuélienne, où d'autres terrains aurifères ont été l'objet d'exploitations difficiles à cause des inondations annuelles de l'Orénoque et du voisinage des tribus indiennes. C'est un pays de culture

peuplé de Français, d'Espagnols, régulièrement administré, salubre, et voisin de deux bons ports fréquentés. Les investigations qui viennent d'avoir lieu font penser que la petite Cordillère qui s'étend de Carupano à San José, de l'est à l'ouest, formant dans ses sinuosités septentrionales la vallée de Cariaquito, est plus ou moins aurifère dans toute son étendue.

(Extrait d'une communication de M. le chargé d'affaire de France au Vénézuéla. 22 octobre 1851.)

Sur l'état de l'industrie aurifère en Californie.

De nouveaux placers d'une grande richesse ont été découverts le mois dernier dans le comté de la Maripoza : une dizaine de Mexicains ont pu réaliser, assure-t-on, une somme de 2 millions de francs au bout de quelques jours de fouilles. La nouvelle de cette bonne fortune s'étant répandue, les mineurs de tous les pays se sont rués contre eux en les forçant d'évacuer le placer, et une population de plus de 5.000 âmes s'y était fixée au bout de quelques jours.

Les fouilles en ce moment se poursuivent avec un succès varié ; on commence à être fixé sur le rendement des mines de quartz qui s'exploitent fort activement sur tous les points du pays ; leur rendement moyen ne paraît pas être au-dessous de 4 *cents* la livre, tandis que les frais d'extraction et de broyage s'élèvent à 1 *cent* la livre environ. La marge ne laisse pas d'être toujours fort considérable sans être tout à fait aussi large qu'on s'y était attendu dans le premier moment de cette industrie nouvelle. Au reste ce quartz est tellement abondant en Californie que des milliers de compagnies trouveraient à s'y occuper fructueusement pendant des siècles encore.

L'or ne laisse pas d'être fort cher sur cette place ; le prix de l'once qualité supérieure est monté à un prix qui laisse peu de bénéfices à ceux qui l'emportent en Europe ou aux États-Unis ; mais il faut des retours pour les masses énormes de marchandises qui arrivent en Californie de tous les points du globe et le seul retour pour le moment, c'est l'or. Les banquiers cherchent à se dédommager sur les traites qu'on leur demande ; les traites à courte échéance sur Paris se vendent en ce moment 4f,75 la piastre.

Le mouvement *en retrait* que j'ai signalé par quelques-unes de mes dernières dépêches tend à se ralentir; les bateaux à vapeur à destination de Panama, qui partaient tous avec des moyennes de 500 passagers, sont aujourd'hui embarrassés de trouver leur compte normal de 250.

Le mouvement *en retour* commence déjà à se prononcer, et ainsi que cela a eu lieu dans les premiers temps, des masses immenses d'émigrants se dirigent de nouveau vers la Californie. Tout annonce que l'émigration de l'année qui va commencer sera la plus forte qu'on ait encore vue.

D'un autre côté, les mines récemment découvertes dans l'Australie commencent à fixer l'attention même de la population de cet État. Un grand nombre de navires est affiché pour Sydney, et tous paraissent trouver des passagers; ce sont généralement des Anglais qui, peu contents de l'accueil qu'on leur fait ici, reprennent la route de cette ville d'où ils étaient partis. Des Américains, çà et là quelques Français, s'embarquent avec eux; ces bâtiments emportant aussi bien des marchandises que des passagers, contribuent par là à soulager cette place déjà si fortement encombrée. Une activité si grande, transportée tout d'un coup au milieu des mers naguère si peu fréquentées, n'indiquerait-elle pas quelque but providentiel dont la portée nous échappe encore?

(*Extrait d'une lettre de* M. Dillon. 3 *décembre* 1851.)

Sur un gîte de combustible minéral découvert dans la commune de Salagnac, canton d'Excideuil (arrondissement de Périgueux).

C'est au hameau de la Roque, situé à l'ouest de Salagnac entre Bellegarde et les Rousettes, que ces indices ont été rencontrés dans un puits approfondi pour donner de l'eau à une métairie.

Le terrain traversé jusqu'à 3 mètres de profondeur consiste en argile grise, onctueuse, sans stratification distincte, empâtant une grande quantité de rognons sphéroïdaux de fer carbonaté en partie décomposé et transformé en oxyde rouge et en hydrate de fer.

De 3 à 4 mètres, on a recoupé des argiles grises un peu feuilletées, à peine bitumineuses par places. Au milieu se

trouve une veinule de houille de 2 à 4 centimètres d'épaisseur, qui se divise parfois en deux ou trois ramifications, sans augmentation dans l'épaisseur totale de la matière combustible.

Au-dessous de l'argile feuilletée existe un banc de grès à peine entamé; son grain est d'une grosseur moyenne: sa couleur, le gris sale moucheté de points blancs kaoliniques.

A 50 mètres à l'ouest de la Roque et sur la déclivité du mamelon, dont les bâtiments occupent le sommet, on voit saillir une roche de grès dur d'un gris jaunâtre. Au-dessus, le sol est éminemment argileux, et la teinte rouge du terrain, les fragments que l'on rencontre y indiquent la présence du fer carbonaté décomposé.

A 800 mètres au S.-S.-E. de la Roque, dans une vigne plantée sur le revers d'un ravin, le sol est parsemé de fragments de la roche sous-jacente; elle offre tantôt un grès de couleurs claires à grains moyens, peu micacé, tantôt un grès jaunâtre à grains fins, micacé, se divisant en plaques d'épaisseur uniforme. Le terrain y affecte une teinte jaune bien prononcée. En creusant le sol de cette vigne, on y a, dit-on, rencontré des veinules de charbon analogue à celle trouvée dans le puits de la Roque.

Une observation faite dans le puits a indiqué la direction des couches à l'O. 21° N. Elles plongent au S. 21° O. sous un angle d'environ 12° avec l'horizon.

Ce lambeau de terrain houiller, dont on ne peut contester les caractères, aurait une étendue apparente de 1 kilomètre quarré tout au plus; car, s'appuyant près de la Roque contre les schistes argileux métamorphiques qui constituent les montagnes au nord, il descend au sud jusque vers le ruisseau de Murand (affluent du Dalon), dont la rive droite ne présente que le grès bigarré bien caractérisé. Mais il pourrait bien plonger sous ces dernières roches et se prolonger vers l'est et le sud-est, en remontant la vallée, dans les bois qui en couvrent la surface.

La houille obtenue de la veinule traversée par le puits varie dans son aspect : tantôt elle se casse en fragments pseudo-réguliers, dont les tranches dures ont peu de brillant; tantôt elle se brise en petits éclats, dont les surfaces courbes sont miroitantes. Dans l'un et l'autre cas, elle se comporte au feu comme une houille sèche à longue flamme.

La formation qui l'a fournie se rattache sans doute à celle du terrain houiller qui occupe une portion de la vallée de la Vézère et dont les lambeaux ne sont pas rares sur les pentes environnantes. Quelques-uns d'entre eux sont stériles; dans les plus riches, de même que dans le bassin principal, les recherches et les exploitations les plus développées ont uniformément constaté la présence d'une couche de houille unique dont l'épaisseur n'excède jamais 35 centimètres et reste souvent au-dessous.

La possibilité d'exploiter cette mince couche de houille sèche est loin d'être démontrée: au Lardin, dans les circonstances les plus favorables, alors que le charbon ne descend jamais à plus de 30 mètres de la surface, une entreprise basée sur d'énormes capitaux s'est terminée par une adjudication qui a livré à un prix minime une concession de 15 kilomètres quarrés, et les adjudicataires reculent depuis six ans devant les faibles dépenses nécessaires pour reprendre les travaux. A Cublas, il est vrai, on exploite depuis plusieurs années, bien que l'extraction s'opère à 100 mètres et plus de profondeur; mais ce résultat est dû à la coexistence de la mine et de la verrerie.

Si l'on applique les données résultant des épreuves faites dans le bassin de la Vézère, au terrain houiller de la Roque, on est conduit à y admettre tout au plus l'existence d'une couche de houille très-peu puissante.

Il se pourrait qu'elle fût représentée par les argiles schisteuses avec veinules de houille que le puits de la Roque a recoupées à 3 ou 4 mètres du jour; mais aussi rien n'indique l'impossibilité de la rencontrer à un niveau inférieur. Seulement, pour peu que sa profondeur fût considérable, les bancs étant presque horizontaux, elle serait vraisemblablement inexploitable, surtout dans une contrée de difficile accès.

(*Extrait d'un rapport de* M. Marrot, *ingénieur en chef des mines*, 22 *décembre* 1851.)

Sur l'extraction de l'émeri dans l'île de Naxos.

L'attention du gouvernement a été appelée plusieurs fois sur la question de l'exploitation des mines d'émeri de Naxos, par les

observations de quelques négociants français qui auraient désiré se charger du commerce de ce minerai. Le droit d'extraction avait longtemps été concédé de gré à gré à une maison anglaise de Smyrne, qui trouvait dans cette entreprise des bénéfices considérables ; mais l'administration grecque, dans le but de tirer un meilleur parti des mines de Naxos, s'est décidée à ne point renouveler le bail de l'entrepreneur et à livrer à la libre concurrence le droit d'extraire et d'exporter annuellement une quantité d'émeri s'élevant à 40.000 quintaux.

Cette mesure a eu un succès favorable aux intérêts du trésor grec, puisque le quintal de minerai, qui était précédemment payé de 5 à 7 drachmes par la société anglaise, a atteint dans les adjudications publiques le prix de 12 à 13 drachmes, et cette année on espère obtenir le prix de 14 à 15. Ce résultat fait comprendre l'importance des bénéfices que réalisaient les anciens fermiers, en supposant même qu'ils se bornassent à n'extraire moyennant payement que la quantité de minerai stipulée dans leur contrat.

La société anglaise pouvait sans doute concourir aux adjudications pour continuer son commerce d'émeri, mais elle n'y aurait plus trouvé les mêmes bénéfices que précédemment, puisque les prix avaient doublé, en qu'en outre le ministre des finances avait pris des mesures de contrôle plus sévères et plus efficaces. Pour ressaisir ce monopole, elle a eu recours à un autre moyen. Elle a fait acheter à des particuliers de Naxos par un prête-nom des terrains propres à l'exploitation de l'émeri, mais au moment où elle se disposait à opérer des extractions, le gouvernement grec s'y est opposé, en se fondant sur son droit de propriété sur toutes les mines que renferme la Grèce et particulièrement sur celle de Naxos. Ce droit, la Grèce le fonde sur les traités mêmes qui portent que tous les biens et droits que le sultan et le gouvernement turc possédaient en Grèce, sont transmis au même titre au gouvernement hellénique.

L'acheteur a intenté un procès au fisc pour être mis en possession du terrain dont il était devenu l'acquéreur, mais il a perdu en première instance ; il a fait appel, et le tribunal supérieur a rendu un jugement interlocutoire portant que le gouvernement grec devra fournir la preuve que les mines de Naxos étaient considérées sous la domination turque comme propriété de l'état. Des démarches ont été faites à Constantinople pour se procurer les justifications que réclame le tribu-

nal d appel. Si on sanctionnait la validité de l'acquisition précitée, il s'ensuivrait nécessairement que le nouveau possesseur pourrait se livrer à l'exploitation de l'émeri, et opposer ainsi au gouvernement grec une concurrence dont les résultats seraient de priver le trésor d'un de ses revenus, s'élevant en ce moment à environ 400.000 drachmes par an.

(*Extrait de deux dépêches de* M. FORTH-ROUEN, *chargé d'affaires de France à Athènes.* 16 *novembre* 1851 *et* 17 *janvier* 1852.)

Résumé des informations contenues dans le rapport du collége des mines sur l'état de l'industrie métallurgique en Suède pendant l'année 1850.

I. EXTRACTION DU MINERAI DE FER.

Il a été extrait en 1850 dans tout le royaume 1.440.114 skeppund de minerai de fer; sur cette quantité 106.599 skepp. proviennent des mines de Dannemora.

La production s'était élevée en :

1849. . . . . .à	1.502.537 skeppund.
De 1844-48 (en moyenne).	1.352.123
1839-43 (en moyenne).	1.356.547
1834-38 (en moyenne).	1.199.281

Le nombre des ouvriers employés à l'extraction s'est élevé à 5.241.

II. FONTE DU MINERAI DE FER.

220 hauts-fourneaux ont produit 727.597 skeppund de fonte en gueuses.

L'année précédente, 198 haut-fourneaux avaient produit 607.223 skeppund.

Il a été fondu par journée de 24 heures 2.219 skeppund.

III. FABRICATION DE LA FONTE MOULÉE.

Les hauts-fourneaux et les fonderies de canon de Finspung, d'Aker et de Hafsjo ont produit 23.254 skeppund, et les autres fonderies 28.043 skeppund de fonte d'un prix de revient de 513.444 ricksdalers.

Il a été exporté à l'étranger 2.879 skeppund de bombes, boulets et canons, principalement en Norwége, en Hollande et en Danemark.

Le nombre des ouvriers employés aux hauts-fourneaux et aux fonderies s'est élevé à 3.096.

IV. FABRICATION DU FER EN BARRES.

5.311 feux de forges ont produit 645.934 skeppund de fer en barres.

Il avait été fabriqué en

1849.	638.827 skeppund.
De 1844-48	603.428
1839-43	575.251
1834-38.	495-448

Il a été employé 3.983 ouvriers.

L'exportation s'est montée à 615.627 skeppund.

Elle avait été en

1849 de.	567.973 skeppund.
1844-48	591.125
1839-43.	572.831
1834-38.	509.652

Elle se divise ainsi entre les quatre principales destinations :

Pour la Grande-Bretagne.	213.851 skeppund.
Pour les États-Unis.	127.473
Pour le Danemark.	52.295
Pour la France.	33.464

V. FABRICATION DU FER OUVRÉ.

Elle s'est élevée à.	86.167 skeppund.
En 1849 à.	80.965

VI. EXPLOITATIONS DITES PRÉCIEUSES.

a. Exploitation de l'or de la mine d'argent du roi Gustave III appartenant au district minier de Hordkopparberg ; il a été extrait 1 marc 15 lod 4 grains d'or.

b. Exploitation de l'argent. Quatre mines ont produit 6.002 marcs d'argent, dont 2.835 marcs 11 lod proviennent de la mine de Sala. Ce résultat est le plus important de la dernière période quinquennale.

701 personnes ont été employées durant l'exercice 1850 à l'exploitation de l'argent et du plomb.

c. Exploitation du cuivre. A donné 10.102 skeppund, résultat plus favorable que celui de chacune des quatre années précédentes.

d. Exploitation du nickel. A produit 2.372 1/2 skeppund de minerai.

e. Fabrication du laiton. A fourni 581 skep.

L'exploitation du cuivre et du nickel a occupé 2.198 ouvriers.

VII. EXPLOITATIONS ET ÉLABORATIONS DIVERSES.

a. Les usines à cuivre ont élaboré 2.291 skep.

b. L'exploitation du plomb s'est élevée à 1.254 skeppund.

c. L'exploitation du zinc a fourni 258 skeppund.

d. La préparation du soufre a donné 872 skep. 19 lisp. 10 d.

e. La fabrication du vitriol s'est montée à 2.168 skeppund.

f. La fabrication de l'alun a fourni 9.253 tonnes.

g. La préparation de l'ocre rouge présente 10.847 tonnes.

h. Mine de plomb. Il en a été préparé 141 skepp.

i. Les ouvrages de porphyre fournis par l'établissement d'Elfoedhal sont estimés 2.000 rdr., et les ouvrages de marbre provenant de la carrière de Kolmarden 3.089 ricksdaler.

k. Manganèse. Il a été obtenu 150 skeppund.

l. La houillère de Nogganas a produit 169.459 tonnes.

L'augmentation considérable de la production du fer, du cuivre, de l'argent en 1850, comparativement aux années précédentes, constate les progrès de l'industrie métallurgique en Suède.

Le total des ouvriers qu'elle emploie est de 17.982.

(*Extrait d'une dépêche de* M. Lobstein, *chargé d'affaires de France à Stockholm, à M. le ministre des affaires étrangères. 12 février 1852.*)

Sur les mines de fer de l'île d'Elbe.

Les richesses minérales de l'île d'Elbe consistent surtout en mines de fer et de cuivre.

La principale mine de fer est celle de Rio, bourg important situé à 10 milles Est de Porto-Ferrajo et peuplé de 3.000 habitants environ.

La mine de fer de Rio, la plus riche et la plus belle peut-être qui existe en ce genre, offre, outre sa richesse, un très-grand intérêt scientifique. On y rencontre ces magnifiques cristaux de fer oligiste qui ont servi au savant Haüy pour déterminer cette espèce minérale.

La mine de Rio s'exploite à ciel ouvert, mais le manque de vie, d'activité qu'on y remarque ne prouve que trop combien le mode d'administration et d'exploitation qui y est en vi-

gueur demanderait à être profondément modifié. Cette mine, qui occupait autrefois 210 ouvriers, n'en emploie plus aujourd'hui que 110. Ces ouvriers reçoivent par jour, suivant la catégorie dans laquelle ils sont classés, un salaire qui varie de $1^{f},47$ à $1^{f},38$. Cette paye, sur laquelle il est fait encore une retenue de 5 p. 100 pour la caisse de secours, semble modique au premier abord, mais on cesse d'en être étonné quand on voit qu'en moyenne la journée de travail se borne à environ six heures, puisqu'elle ne commence jamais qu'une heure et demie au moins après le lever du soleil pour se terminer à deux heures après midi et qu'il y a dans cet intervalle un repas assez long.

Aux 110 mineurs employés aux travaux de la mine, il faut ajouter 60 hommes chargés de conduire les ânes qui transportent le minerai depuis le lieu d'où il est extrait jusqu'au port.

L'extraction du minerai est annuellement d'environ 22.000 t., et sur cette quantité, à peu près 10.000 vont en Toscane aux fonderies de Follonica, Cecina et Macchiatonda. Le surplus est exporté à Naples, à Gênes ou vendu à une compagnie anglaise. Cette dernière à elle seule en exporte environ 7.000 tonnes; Naples en reçoit de 1.000 à 2.000 tonnes et Gênes 3.500 tonnes. Les forges qui existaient à Bastia il y a quelques années tiraient en grande partie leur minerai de Rio. On assure qu'une nouvelle compagnie doit incessamment reprendre l'exploitation de ces forges, et qu'elle continuera à s'approvisionner à Rio. L'ancienne compagnie y prenait annuellement de 5 à 9.000 tonnes de minerai.

Le minerai de Rio rend, selon la localité d'où il est extrait, de 20 à 80 p. 100; sa richesse moyenne est environ 50 p. 100.

L'unité de mesure pour l'extraction et pour la vente du minerai se nomme le *cent;* le cent pèse 33.333 livres toscanes (11.111 kil.). Un cent coûte à extraire 67 fr. et se vend, suivant le tarif établi par le gouvernement et pris sur le port, environ 278 fr.

La mine de Rio est affermée à une compagnie toscane pour trente années moyennant une somme annuelle de 600.000 L. (500.000 fr.); mais gênée, dit-on, par les conditions d'exploitation qui lui sont imposées, cette compagnie ne peut, comme elle le voudrait sans doute, apporter à son entreprise les améliorations et les perfectionnements qu'elle réclame. Jusqu'à présent, sans se préoccuper de l'avenir, elle continue les tra-

vaux commencés avant elle, ou en fait exécuter de nouveaux dans les endroits les plus riches; elle semble ne songer qu'à extraire le plus possible de minerai et partout où le travail lui semble le plus facile et le moins coûteux. Avec un tel système, il est à craindre que dans un temps donné la mine de Rio ne perde singulièrement de sa valeur.

Le plus grand et peut-être le seul changement connu jusqu'à ce jour, que la compagnie concessionnaire se propose de faire, est l'établissement d'un plan incliné pour le transport du minerai de la mine au bord de la mer.

Rio possède aussi diverses sources d'une eau ferrugineuse appréciée en médecine et qui peut se transporter au loin sans perdre de ses qualités.

Entre Rio et Porto Longone, sur le bord même de la mer, se trouvent de riches carrières de marbre blanc et de marbre serpentin.

La riche mine de la Calamita, à environ 9 milles de Porto-Ferrajo au delà de Capoliveri dans la direction de Porto Longone, a fourni les plus beaux échantillons d'aimant qu'on rencontre dans les cabinets d'histoire naturelle. Cette mine qui offre un grand intérêt n'est point exploitée, malgré la richesse et la qualité de son minerai de fer, qui ne le cède en rien à celui de Rio.

Les mines de cuivre de Sainte-Lucie, à 3 milles de Porto-Ferrajo, et celles de Pomonte, à environ 20 milles au delà de Marciana, ne sont pas non plus exploitées, quoique leur richesse soit incontestable.

Entre Campo et Pomonte, le long de la côte, existent des carrières d'un granite estimé. L'île possède encore, mais en petite quantité, le mercure, l'antimoine, etc.

(*Extrait d'une lettre adressée à M. le ministre des affaires étrangères par M. l'agent consulaire de France de Porto-Ferrajo*, 28 *mai* 1852.)

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME PREMIER.

MINÉRALOGIE. — GÉOLOGIE.

CHIMIE.

MÉTALLURGIE ET MINÉRALURGIE.

MÉCANIQUE.— EXPLOITATION.



EXPLICATION DES PLANCHES

DU TOME PREMIER.

(*) Je n'ai pu examiner que d'une manière incidente et très-sommaire les effets de l'*arc-boutement*, et leur influence sur le mode d'établissement d'un état d'équilibre definitif dans les grandes surcharges. Il n'est peut-être pas inutile d'indiquer aux ingénieurs qui auraient l'intention d'approfondir un sujet que j'ai seulement effleuré, les pages dans lesquelles M. Poncelet a soumis au calcul la question envisagée dans toute sa généralité. Le travail véritablement classique de ce savant ingénieur sur *la stabilité des revêtements et de leurs fondations* (*a*) renferme (pages 246 à 260) des recherches qui devront servir de base à la détermination des conditions analytiques de l'arc-boutement, et du mode de répartition du poids des surcharges sur les maçonneries. C.

(*a*) *Mémorial du génie*, n° 13.

Je place ici la description détaillée à laquelle j'ai renvoyé, page 386 de ce volume. Cette description, qui n'eût pas été à sa place dans le texte du mémoire, est cependant indispensable, par suite de la petitesse de l'échelle des figures, pour l'intelligence des nombreuses dispositions nouvelles que présente la machine. C.

1° Chaudières.

La construction de la double chaudière elliptique ne présente qu'une seule particularité, le mode d'ajustement des tirants transversaux : au lieu de s'assembler avec des T rivés aux parois, ils traversent celles-ci, sont fendus horizontalement et fortement serrés par des coins en fer, et s'appuient à l'extérieur par de larges épaulements (τ', τ, *fig.* 1, Pl. IX).

Prise de vapeur.

Chacun des corps de chaudières est muni d'un dôme (A) dans lequel s'élève un col de cygne qui s'assemble avec une boite en bronze B. Celle-ci sort de la chaudière au moyen d'un stuffing-box. Un tirant C, muni à la partie supérieure d'un épaulement et en bas d'une vis et d'un écrou, maintient le système en joint.

Les deux régulateurs (D, Pl. VIII) sont manœuvrés simultanément comme il suit : deux bielles (E) s'articulent à deux manivelles calées, à 180° l'une de l'autre, sur l'arbre F, qui traverse latéralement la boite à feu, du côté du mécanicien, et porte à l'extérieur un secteur denté G. Ce secteur engrène avec une vis sans fin montée sur l'axe de la roue à poignées H.

L'emploi de la vis sans fin était nécessité par la résistance considérable que présente la manœuvre des deux régulateurs.

2° Distribution.

Le tuyau de prise I (Pl. VIII et IX) s'embranche sur la boite B, descend extérieurement suivant la section droite du cylindre, du côté du mécanicien, et arrive au tronc commun des conduits des deux boites de distribution, après trois inflexions à angle droit (I, K, K, Pl. IX, *fig.* 2). Des

emmanchements à presse-étoupes, répartis sur ce tuyau ainsi contourné, lui donnent toute la flexibilité qu'exige la mobilité des cylindres relativement à la chaudière.

La vapeur est dirigée dans les deux boîtes de distribution W, W (Pl. IX, *fig.* 2) boulonnées latéralement aux cylindres. Ces boîtes portent des appendices W', W', venus de fonte avec elles, qui rachètent l'excès d'écartement des deux longerons (α, α) du train mobile, auxquels le système des cylindres est relié par les boulons *m*, *m*, *m* (Pl. VIII). Le poids des cylindres est d'ailleurs supporté, suivant l'usage, non par ces boulons, mais par les épaulements dont sont munis les appendices W', W'.

Chacune des quatre paires de barres d'excentriques *h*, *h* (Pl. VIII et Pl. IX, *fig.* 2) commande une coulisse simple *g*. Le tiroir est placé verticalement, et la transmission directe. Mais le tiroir n'oscillant pas dans le même plan vertical que le coulisseau, celui-ci n'agit pas immédiatement sur la tige *z* du tiroir; son prolongement, maintenu par deux guides en fonte (*x*, *x*), transmet le mouvement à la tige *z* au moyen d'un ergot *y*.

Détente et changement de marche.

Le levier de changement de marche *a* (Pl. VIII) commande chaque paire de coulisses au moyen de la bielle *b*, du levier coudé *c*, du levier *n e* calé sur l'arbre *d*, et de la bielle *f*. Le même levier gouverne les deux machines, au moyen des deux tringles *b*, *b*. Le mode de transmission du mouvement étant le même dans les deux machines, on voit que l'un des systèmes de coulisses s'abaisse quand l'autre s'élève; les barres d'excentriques sont disposées en conséquence, c'est-à-dire *croisées* dans l'une des machines, et non croisées dans l'autre. Les deux systèmes de pièces se font ainsi équilibre : de sorte que l'addition des contre-poids individuels *n*, *n* (Pl. VIII et IX), loin de faciliter la manœuvre du levier *a*, ne fait au contraire que la rendre plus pénible. Mais le constructeur a jugé ces contre-poids nécessaires pour soulager les leviers de suspension de chaque appareil.

Manœuvre du levier de changement de marche par la vapeur.

Au reste, la manœuvre du levier exigeant une grande force (indépendamment de la résistance propre des pièces qui participent au mouvement des tiroirs de distribution), quand les quatre tiroirs sont soumis à une pression effective considérable, on peut au besoin manœuvrer ce levier au moyen de la vapeur. Il porte à cet effet un prolongement inférieur, relié par une petite bielle à un piston mobile dans un petit corps de pompe boulonné sur le flanc de la machine. La vapeur est admise à volonté dans ce cylindre au moyen d'une valve manœuvrée par un levier auxiliaire (Pl. VIII, et Pl. IX *fig.* 2).

Échappement.

Les conduits des lumières d'échappement se contournent en saillie au-dessus des cylindres, et viennent aboutir chacun à un orifice demi-circulaire L (Pl. IX, *fig.* 2). Ces deux orifices sont surmontés par le tuyau d'échappement proprement dit. Voici les dispositions prises pour

isoler parfaitement le jet de vapeur, et assurer l'imperméabilité de la conduite, malgré les mouvements relatifs des orifices L et de la boîte à fumée, mouvements qui comprennent les oscillations horizontales du train autour de sa cheville ouvrière, et les oscillations verticales dues à la flexion des ressorts de suspension.

Le tuyau en laiton L porte à la partie supérieure, immédiatement au-dessous de l'échappement variable, un renflement cylindrique entouré d'un collier en fer. Ce collier n'est pas fixe : il peut tourner autour d'un axe parallèle à l'axe longitudinal de la machine, de manière à se prêter, tout en maintenant le tuyau, aux légères obliquités que doit prendre celui-ci, par suite des oscillations horizontales de sa base. Ce tuyau s'assemble d'ailleurs au moyen d'un joint à rotule avec le collet du tuyau de sortie I des cylindres.

Quant aux mouvements verticaux, tout le système du tuyau d'échappement y participe à peu près comme les cylindres eux-mêmes. L'axe horizontal autour duquel tourne le collier cité tout à l'heure, peut se mouvoir parallèlement à lui-même, en décrivant un arc de cercle d'un grand rayon qui, à cause de la faible amplitude des déplacements, se confond à très-peu près avec la verticale : les deux tourillons du collier sont reçus à cet effet par deux bielles, horizontales dans la position moyenne, et articulées à l'autre bout à une pièce rivée sur l'une des parois latérales de la boîte à fumée. Les extrémités libres de ces bielles formant palier pour les tourillons du collier sont visibles sur la coupe longitudinale (Pl. VIII).

Quoique peu prononcées, les variations de niveau de l'orifice de la tuyère et surtout ses obliquités, doivent exercer sur le tirage une influence nuisible : il eût été facile et préférable de conserver à l'orifice, et par suite au jet de vapeur, une position et une direction tout à fait invariables.

Il ne suffisait pas de donner au tuyau d'échappement la flexibilité nécessaire, il fallait aussi disposer sa pénétration dans le fond de la boîte à fumée de telle sorte que les déplacements pussent s'opérer sans permettre aucune rentrée d'air dans la boîte. Une couronne en fonte, dont le vide est assez large pour laisser aux oscillations horizontales tout le jeu nécessaire, est boulonnée sur le fond de la boîte à fumée. Sur la face parfaitement dressée de cette couronne, repose une autre pièce annulaire également en fonte, ayant pour section verticale celle d'une cornière, et présentant deux faces dressées, l'une plane et horizontale qui s'appuie sur la couronne, l'autre verticale et cylindrique sur laquelle s'applique très-exactement le renflement circulaire ou collet du tuyau L des cylindres. Dans les oscillations horizontales, la couronne mobile glisse sur la couronne fixe, et dans les mouvements verticaux, le collet du tuyau glisse sur la face verticale cylindrique de la couronne mobile, sans que l'air extérieur puisse s'introduire dans la boîte à fumée.

3° Alimentation.

Chacune des machines partielles a deux pompes dont les corps (*h'*, Pl. VIII, et Pl. IX, *fig.* 1 et 2) sont boulonnés extérieurement sur les longerons des trains mobiles. Chaque plongeur reçoit le mouvement d'un excentrique spécial, calé sur le prolongement de la fusée de l'essieu

moteur. Cette disposition rejette plus encore vers l'extérieur, les manivelles d'accouplement déjà écartées des roues par suite de la position extérieure des longerons. Mais cet inconvénient ne peut être mis en balance avec l'avantage que présentent les pompes placées entièrement à l'extérieur.

La mobilité des supports des pompes relativement à la chaudière, a exigé, comme pour les conduites de vapeurs, des coudes et des emmanchements à presse-étoupe sur le tuyau d'aspiration et de refoulement qui vient s'insérer en ρ (Pl. VIII) sur la chaudière.

La machine est d'ailleurs pourvue, comme la plupart des locomotives en activité sur les chemins allemands, d'une petite machine spéciale pour l'alimentation au repos (*). Cette machine est accolée à la double boîte à feu, entre les deux trains mobiles, et du même côté que les portes des foyers, c'est-à-dire du côté du chauffeur. Elle n'est par suite pas indiquée sur la Pl. VIII, mais elle l'est sur la Pl. IX, *fig.* 2.

4° Châssis et supports.

Le système de la double chaudière est installé sur deux longerons (α', α', Pl. IX, *fig.* 2) de 14m,25 de longueur, boulonnés aux extrémités sur deux traverses en bois qui reçoivent également les cornières extérieures servant de support à la plate-forme qui règne sur tout le pourtour de la machine. Outre les points d'appui des boîtes à feu et à fumée, chacun des corps cylindriques est rattaché au châssis par six supports indiqués en trait pointillé sur l'élévation (Pl. VIII).

La *fig.* 1, Pl. IX, indique comment le châssis général, qui est *intérieur*, s'appuie sur les châssis *extérieurs* des deux trains mobiles. Chacun d'eux est relié, comme on le voit sur cette coupe, à un appendice, extérieur pour le premier, intérieur pour le second : une espèce d'essieu T, auquel la charge est appliquée à ses deux bouts, la transmet par son milieu renflé en sphère à un coulisseau, puis à la glissière V, fortement boulonnée d'une part sur le longeron de l'avant-train, de l'autre sur le support auxiliaire placé à l'à-plomb du châssis général.

La pièce V est en acier, ainsi que le coulisseau ; elle porte deux saillies circulaires parfaitement dressées, ayant leur centre sur l'axe de la cheville ouvrière, et sur lesquelles glisse le coulisseau pressé par l'essieu T.

Pour que le châssis général ne puisse pas se séparer des trains mobiles dans les mouvements et les soubresauts de la machine, l'essieu T est coiffé d'un chapeau de palier, fixé de part et d'autre de l'essieu par un gros boulon (Pl. VIII, élévation, et Pl. IX, *fig.* 1), qui traverse le coulisseau et la glissière V elle-même, et dont l'écrou, médiocrement serré, maintient les pièces en contact sans gêner l'oscillation horizontale du

---

(*) Cette disposition commence à se généraliser même en France. Le temps n'est sans doute pas éloigné où le moteur additionnel ne sera plus un simple accessoire, et remplacera complétement les pompes mues par la machine elle-même. Avec les plongeurs à grande course, usités aujourd'hui, l'alimentation devient, aux grandes vitesses, une opération délicate, et il y aurait un avantage réel à rendre le mouvement des plongeurs indépendant de la vitesse de translation.

train. Il est presque inutile d'ajouter que les ouvertures qui livrent passage aux boulons dans la pièce V sont aussi ovalisées que l'exige le jeu des trains autour de la cheville ouvrière. Toute la charge est ainsi répartie sur quatre points d'appui, c'est-à-dire sur les milieux renflés des quatre entretoises T.

Cheville ouvrière.

Le pivot, ou cheville ouvrière, β, est rattaché à la chaudière par ses deux extrémités, et au train mobile par son milieu. L'extrémité supérieure est coiffée d'une espèce de crapaudine en fer forgé, pourvue d'appendices qui embrassent la chaudière comme une *sous-ventrière* (Pl. IX, *fig.* 1). L'extrémité inférieure est saisie par une forte pièce en forme de V, qui embrasse le pivot au moyen d'une douille, et dont les deux bouts repliés horizontalement viennent se fixer par des rivets au bas de la chaudière (*voir* la coupe longitudinale, Pl. VIII, et le plan, Pl. IX). La cheville ouvrière, qui d'ailleurs ne porte rien, est maintenue en place dans le sens vertical, d'une part au moyen de l'épaulement qui s'appuie sur le rebord de la douille, et de l'autre au moyen d'une clavette (Pl. IX, *fig.* 1).

Elle entraîne le train mobile au moyen d'un coussinet logé dans une douille percée au centre d'une espèce d'étoile à 6 branches (Pl. IX, *fig.* 2); deux de ces rayons sont boulonnés sur les longerons du train, et les quatre autres, sur deux entretoises transversales boulonnées elles-mêmes sur ces longerons. Celle des deux entretoises *transversales* qui est la plus rapprochée de l'essieu moteur sert en même temps de support à une entretoise *longitudinale*, pourvue de fourchettes qui saisissent, au moyen de coussinets, le corps extrêmement court de l'essieu coudé, et limitent ses flexions. Tous ces détails sont d'ailleur parfaitement intelligibles à la simple inspection de la coupe longitudinale et du plan.

Le trait ponctué sur le plan, de part et d'autre de l'entretoise transversale la plus rapprochée du foyer, indique le contour du contre-poids destiné à équilibrer les cylindres et à ramener sur l'axe de la cheville ouvrière le centre de gravité de tout le système du train mobile; on aurait pu, comme dans les machines américaines ordinaires, donner aux chevilles ouvrières des positions excentriques, nécessairement inverses dans les deux trains; mais c'eût été renoncer à la symétrie, d'ailleurs complète de la machine, et aux avantages qu'elle présente.

Suspension.

Elle ne présente rien de particulier : le châssis de chacun des trains est suspendu, par les broches à écrou γ, aux ressorts qui s'appuient sur les boîtes à graisse au moyen des étriers δ.

5° Frein.

Il n'agit que sur les deux paires de roues d'un même train; les sabots υ, υ, υ, υ. sont suspendus aux châssis, au lieu d'être comme dans la plupart des freins actuels, supportés directement par les boîtes à graisse

